




# 电力工程设计手册



## • 火力发电厂除灰设计 •

中国电力工程顾问集团有限公司　编著

中国电力出版社

# 电力工程设计手册






# 电力工程设计手册



## • 火力发电厂除灰设计 •

中国电力工程顾问集团有限公司　编著

Power Engineering Design Manual

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书是《电力工程设计手册》系列手册中的一个分册，是按火力发电厂除灰系统设计要求编写的实用性工具书，可以满足火力发电厂各设计阶段除灰系统设计的内容深度要求。本书包括了火力发电厂除灰系统设计原则、设计要求、设计计算、系统设计、设备选择与布置及成熟案例等内容。

本书依据最新的相关规范、规程和标准的内容要求编写，充分吸纳了21世纪火力发电厂建设的先进理念和成熟技术，全面反映了近年来新建火力发电厂工程中使用的除灰系统设计方面的新技术、新设备、新工艺，列入了大量成熟可靠的设计基础资料和技术指标。

本书是从事火力发电厂除灰设计、施工和运行管理人员的工具书，也可作为其他行业从事物料输送和储存等方面设计人员的参考书，还可供高等院校相关专业的教师和学生参考使用。

**图书在版编目（CIP）数据**

电力工程设计手册. 火力发电厂除灰设计 / 中国电力工程顾问集团有限公司编著. —北京：中国电力出版社，2017.5
ISBN 978-7-5198-0551-7

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①中… Ⅲ. ①火电厂–除灰系统–建筑设计–手册 Ⅳ. ①TM7-62②TM621.7-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第061780号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
印　　刷：北京盛通印刷股份有限公司
版　　次：2017年5月第一版
印　　次：2017年5月北京第一次印刷
开　　本：787毫米×1092毫米　16开本
印　　张：21.75
字　　数：772千字
印　　数：0001—1000册
定　　价：130.00元

## 《电力工程设计手册》
## 编辑委员会



## 《电力工程设计手册》
## 秘 书 组

## 《火力发电厂除灰设计》
## 编 写 组


**主　　编** 许　华

**参编人员**（按姓氏笔画排序）

马爱萍　于永志　于顺生　万　屹　王仕能　王灵巧
吕　震　宋长清　秦　学　党　楠　黄　喆　谢　波
雷文军　蔡　军


## 《火力发电厂除灰设计》
## 编辑出版人员


**编审人员** 宋红梅　郑晓萌　何　郁　张运东　刁晶华

**出版人员** 王建华　李东梅　邹树群　黄　蓓　李　楠　陈丽梅
安同贺　王红柳　张　娟

# 序言

改革开放以来，我国电力建设开启了新篇章，经过30多年的快速发展，电网规模、发电装机容量和发电量均居世界首位，电力工业技术水平跻身世界先进行列，新技术、新方法、新工艺和新材料的应用取得明显进步，信息化水平得到显著提升。广大电力工程技术人员在30多年的工程实践中，解决了许多关键性的技术难题，积累了大量成功的经验，电力工程设计能力有了质的飞跃。

党的十八大以来，中央提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念。习近平总书记提出了关于保障国家能源安全，推动能源生产和消费革命的重要论述。电力勘察设计领域的广大工程技术人员必须增强创新意识，大力推进科技创新，推动能源供给革命。

电力工程设计是电力工程建设的龙头，为响应国家号召，传播节能、环保和可持续发展的电力工程设计理念，推广电力工程领域技术创新成果，推动电力行业结构优化和转型升级，中国电力工程顾问集团有限公司编撰了《电力工程设计手册》系列手册。这是一项光荣的事业，也是一项重大的文化工程，对于培养优秀电力勘察设计人才，规范指导电力工程设计，进一步提高电力工程建设水平，助力电力工业又好又快发展，具有重要意义。

中国电力工程顾问集团有限公司作为中国电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”，在电力勘察设计技术上处于国际先进和国内领先地位。在百万千瓦级超超临界燃煤机组、核电常规岛、洁净煤发电、空冷机组、特高压交直流输变电、新能源发电等领域的勘察设计方面具有技术领先优势。中国电力工程顾问集团有限公司

还在中国电力勘察设计行业的科研、标准化工作中发挥着主导作用，承担着电力新技术的研究、推广和国外先进技术的引进、消化和创新等工作。

这套设计手册获得了国家出版基金资助，是一套全面反映我国电力工程设计领域自有知识产权和重大创新成果的出版物，代表了我国电力勘察设计行业的水平和发展方向，希望这套设计手册能为我国电力工业的发展作出贡献，成为电力行业从业人员的良师益友。

汪建平

2017年3月18日

# 总前言

电力工业是国民经济和社会发展的基础产业和公用事业。电力工程勘察设计是带动电力工业发展的龙头，是电力工程项目建设不可或缺的重要环节，是科学技术转化为生产力的纽带。新中国成立以来，尤其是改革开放以来，我国电力工业发展迅速，电网规模、发电装机容量和发电量已跃居世界首位，电力工程勘察设计能力和水平跻身世界先进行列。

随着科学技术的发展，电力工程勘察设计的理念、技术和手段有了全面的变化和进步，信息化和现代化水平显著提升，极大地提高了工程设计中处理复杂问题的效率和能力，特别是在特高压交直流输变电工程设计、超超临界机组设计、洁净煤发电设计等领域取得了一系列创新成果。“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念和实现全面建设小康社会奋斗目标，对电力工程勘察设计工作提出了新要求。作为电力建设的龙头，电力工程勘察设计应积极践行创新和可持续发展思路，更加关注生态和环境保护问题，更加注重电力工程全寿命周期的综合效益。

作为电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”，中国电力工程顾问集团有限公司是我国特高压输变电工程勘察设计的主要承担者，包括世界第一个商业运行的 1000kV 特高压交流输变电工程、世界第一个 ± 800kV 特高压直流输电工程等；是我国百万千瓦级超超临界燃煤机组工程建设的主力军，完成了我国 70%以上的百万千瓦级超超临界燃煤机组的勘察设计工作，创造了多项“国内第一”，包括第一台百万千瓦级超超临界燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界空冷燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界二次再热燃煤机组等。

在电力工业发展过程中，电力工程勘察设计工作者攻克了许多关键技术难题，积累了大量的先进设计理念和成熟设计经验。编撰《电力工程设计手册》系列手册可以将这些成果以文字的形式传承下来，进行全面总结、充实和完善，引导电力工程勘察设计工作规范、健康发展，推动电力工程勘察设计行业技术水平提升，助力勘察设计从业人员提高业务水平和设计能力，以适应新时期我国电力工业发展的需要。

2014 年 12 月，中国电力工程顾问集团有限公司正式启动了《电力工程设计手册》系列手册的编撰工作。《电力工程设计手册》的编撰是一项光荣的事业，也是一项艰巨和富有挑战性的任务。为此，中国电力工程顾问集团有限公司和中国电力出版社抽调专人成立了编辑委员会和秘书组，投入专项资金，为系列手册编撰工作的顺利开展提供强有力的保障。在手册编辑委员会的统一组织和领导下，700 多位电力勘察设计行业的专家学者和技术骨干，以高度的责任心和历史使命感，坚持充分讨论、深入研究、博采众长、集思广益、达成共识的原则，以内容完整实用、资料翔实准确、体例规范合理、表达简明扼要、使用方便快捷、经得起实践检验为目标，参阅大量的国内外资料，归纳和总结了勘察设计经验，经过几年的反复斟酌和锤炼，终于编撰完成《电力工程设计手册》。

《电力工程设计手册》依托大型电力工程设计实践，以国家和行业设计标准、规程规范为准绳，反映了我国在特高压交直流输变电、百万千瓦级超超临界燃煤机组、洁净煤发电、空冷机组等领域的最新设计技术和科研成果。手册分为火力发电工程、输变电工程和通用三类，共 31 个分册，3000 多万字。其中，火力发电工程类包括 19 个分册，内容分别涉及火力发电厂总图运输、热机通用部分、锅炉及辅助系统、汽轮机及辅助系统、燃气-蒸汽联合循环机组及附属系统、循环流化床锅炉附属系统、电气一次、电气二次、仪表与控制、结构、建筑、运煤、除灰、水工、化学、供暖通风与空气调节、消防、节能、烟气治理等领域；输变电工程类包括 4 个分册，内容分别涉及变电站、架空输电线路、换流站、电缆输电线路等领域；通用类包括 8 个分册，内容分别涉及电力系统规划、岩土工程勘察、工程测绘、工程水文气象、集中供热、技术经济、环境保护与水土保持和职业安全与职业卫生等领域。目前新能源发电蓬勃发展，中国电力工程顾问集团有限公司将适时总结相关勘察设计经验，

编撰新能源等系列设计手册。

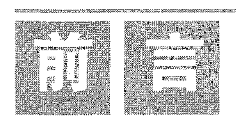
《电力工程设计手册》全面总结了现代电力工程设计的理论和实践成果，系统介绍了近年来电力工程设计的新理念、新技术、新材料、新方法，充分反映了当前国内外电力工程设计领域的重要科研成果，汇集了相关的基础理论、专业知识、常用算法和设计方法。全套书注重科学性、体现时代性、增强针对性、突出实用性，可供从事电力工程投资、建设、设计、制造、施工、监理、调试、运行、科研等工作者使用，也可供相关教学及管理工作者参考。

《电力工程设计手册》的编撰和出版，是电力工程设计工作者集体智慧的结晶，展现了当今我国电力勘察设计行业的先进设计理念和深厚技术底蕴。《电力工程设计手册》是我国第一部全面反映电力工程勘察设计的系列手册，难免存在疏漏与不足之处，诚恳希望广大读者和专家批评指正，如有问题请向编写人员反馈，以期再版时修订完善。

在此，向所有关心、支持、参与编撰的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《电力工程设计手册》编辑委员会

2017年3月10日



# 前言

《火力发电厂除灰设计》是《电力工程设计手册》系列手册之一。

火力发电厂除灰系统经过几十年的发展，其除灰设计范围和内容得到极大的扩展，到目前为止，输送和储存的物料有灰、渣、石子煤、石灰石粉、床料、煤泥等。随着新技术、新设备等的不断发展和应用，系统输送量、输送距离等都一再突破极限，如气力输灰系统出力从每小时几吨发展到几十吨，甚至上百吨，输送距离也从过去的几十米，发展到现在的几百米、几千米，系统设计技术指标也更先进，运行更加经济可靠。此外，随着环保和灰渣综合利用等方面的要求，石灰石粉制备和输送系统、煤泥系统、粉煤灰分选系统等许多新设计领域也相继发展起来。

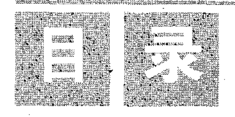
本书系统地收集整理了近 30 年来国内外燃煤电厂一系列成熟的除灰渣系统设计技术，以及中国电力工程顾问集团有限公司多年来的设计经验和部分研究成果。内容涉及粉煤灰、渣等物料输送和储存技术，包括气源系统、粉煤灰分选等系统设计技术等。本书编制主要是以灰渣输送为基础，按气力、水力和机械输送系统为主要章节进行编制；对气源系统、物料储存系统及卸料系统，由于有别于输送系统，因此单独进行章节编制。对于循环流化床锅炉的附属系统设计部分，如石灰石粉制备系统、煤泥输送系统等，详见本系列手册《循环流化床锅炉附属系统设计》的相关章节及内容，本书不再重复编写。

本书主编单位为中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司，参编单位为中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司。本书由许华担任主编，负责总体框架设计和校稿，并编写前言、第一章、附录等；马爱萍参与编写前言；秦学、雷文军编写第二章；于顺生、王仕能编写第三章；于永志、黄喆、宋长清、吕震编写第四章；王灵巧、党楠编写第五章；蔡军、谢波编写第六章；万屹编写第七章。

本书是从事火力发电厂除灰专业设计人员的工具书，可以满足火力发电厂除灰系统前期设计、初步设计、施工图设计等阶段的深度要求。本书也可作为其他行业从事除灰专业设计人员的参考书，也可供高等院校相关专业教师和学生参考使用。

《火力发电厂除灰设计》编写组

2017年2月



# 目录

# 第一章

# 综　述

## 第一节　除灰系统

除灰系统通常是指火力发电厂除灰、除渣、除石子煤等系统的简称。

### 一、设计范围

除灰系统的设计范围一般分为厂内部分和厂外部分。

1. 厂内部分

厂内部分一般指火力发电厂围墙范围内的系统设计，包括的范围见表1-1。

**表1-1　除灰系统厂内部分设计范围**

| 厂内部分 | 普通煤粉炉 | 循环流化床锅炉 |
|---|---|---|
| 除渣系统 | 从锅炉下联箱至渣仓排渣门为止，含捞渣机（干渣机）渣仓系统、冷却水和处理系统、管路系统 | 从锅炉排渣口（或锅炉冷渣器出口）至渣仓卸料设备出口为止 |
| 除灰系统 | 从锅炉省煤器灰斗、除尘器灰斗出口至灰库卸料设备出口，含气力输送系统、灰斗气化系统、灰管管路系统、灰库系统 | 从锅炉省煤器灰斗、除尘器灰斗出口至灰库卸料设备出口，含气力输送系统、灰斗气化系统、灰管管路系统、灰库系统 |
| 石子煤处理系统 | 从磨煤机石子煤排口至石子煤仓出口或至运石子煤汽车为止，含石子煤输送和储存系统 | |
| 粉煤灰分选系统 | 从原灰库卸料口至成品库卸料设备出口 | |
| 石灰石粉制备和输送系统 | | 从石灰石堆场输送设备出口或石灰石粉成品仓入口至锅炉石灰石粉入料口，一般包括石灰石粉制备和石灰石粉输送系统、石灰石粉管路系统 |
| 煤泥系统 | | 从煤泥棚输送设备出口或煤泥仓入口至锅炉煤泥口接口，一般包括煤泥储存系统和煤泥输送系统、煤泥管路系统 |
| 空气压缩机站系统 | 从空气压缩机入口至全厂各用气气源接口，一般含全厂仪用、输送用等空气压缩机及后处理系统，空气管路系统 | |

2. 厂外部分

厂外部分一般是指火力发电厂围墙范围外的系统设计，包含汽车外运系统、管道输送系统、带式输送机系统以及船舶运输系统，一般指从厂内储存设施卸料设备出口至灰场或船舶入口（或综合利用）处。

### 二、设计阶段和主要内容深度

（一）初步可行性研究阶段

初步可行性研究的主要目的是作为编制近期电力发展规划、热电联产规划、煤矸石发电利用规划，以及确定投资方和编制项目可行性研究报告的基础，主要是从电力区域建设的角度，把某个电厂作为一个“点”，研究其建设的必要性和可行性，是项目前期工作的一个环节，供国家及潜在的投资方初步决策时参考。

初步可行性研究报告中除灰系统主要内容深度按DL/T 5374—2008《火力发电厂初步可行性研究报告内容深度规定》执行，主要内容包括：①锅炉排灰渣量及排石子煤量计算；②除灰系统方案的初步设想；③了解当地环境保护及灰渣综合利用要求。

（二）可行性研究阶段

火力发电厂可行性研究工作是项目前期工作中最重要的环节，其目的是从“点”到“面”，着重研究电厂建设的外部条件。

可行性研究报告须经国家主管部门认可的咨询机

构组织审查，审查后的可行性研究报告是上报项目核准申请报告的依据之一。项目通过审核后，方可全面开工。

可行性研究报告中除灰系统主要内容深度按DL/T 5375—2008《火力发电厂可行性研究报告内容深度规定》执行，主要内容如下：

（1）图纸。原则性除灰渣系统图、石子煤处理系统图、空气压缩机站系统图、石灰石粉制备和输送系统图、粉煤灰分选系统图及煤泥系统图等。

（2）系统说明书。①除灰渣系统、石子煤处理系统、空气压缩机站系统、石灰石粉制备和输送系统、粉煤灰分选系统、煤泥系统的主要设计原则和形式的拟定。②锅炉排灰渣量及排石子煤量、压缩空气耗量、石灰石耗量、煤泥耗量计算结果。③灰、渣、石子煤、石灰石粉制备和输送系统，以及空气压缩机站系统、粉煤灰分选系统、煤泥系统等主要工艺系统流程描述，主要设备选型和系统出力的选取。多方案时应分别论述，并提出本阶段推荐意见。④灰渣综合利用相关描述。

（3）根据工程需要编制的专题报告。

（三）初步设计阶段

初步设计又称概念设计，是在审定的可行性研究成果基础上，着重研究拟建电厂的厂内系统设计。

初步设计是各个专业确定主要工艺设计方案、主要技术经济指标和主辅机设备的重要工作阶段。初步设计阶段是业主表达工程建设理念和项目建设愿望的最佳阶段。初步设计阶段也是设计单位进行设计方案优化，工程创优策划，争创优质工程设计奖的最佳时期。

初步设计报告中除灰系统主要内容深度按DL/T 5427—2009《火力发电厂初步设计文件内容深度规定》执行，主要内容如下：

（1）图纸。

1）系统类图纸有除灰、渣及石子煤处理系统图，全厂气源系统图，石灰石粉制备和输送系统图，粉煤灰分选系统图，煤泥输送系统图等。

2）布置类图纸有除灰设施总平面布置图和平剖面布置图。

（2）说明书。说明书一般由概述、除灰系统的选择和除灰设备选择及其布置三部分组成。

1）概述。包括工程概况、设计依据、主要设计原则和设计原始数据。

a. 工程概况中说明电厂建设规模和规划情况、本期容量，锅炉、除尘器型式等，对于扩建工程，应简述已有机组系统配置情况和与本期的关系。

b. 设计依据包括审批单位对可行性研究报告的审查意见，可行性研究报告及其他有关文件。

c. 主要设计原则中说明除灰渣系统、除石子煤系统、石灰石粉制备和输送系统、煤泥输送系统等拟定的主要设计原则及主要特点，并说明对除灰系统用水方面的要求和环境保护及综合利用方面对除灰系统的要求，以及除灰系统控制方式。

d. 设计原始资料包括锅炉燃料分析及灰渣成分分析资料、机组年利用小时数、主要工程条件、简述灰渣综合利用的说明，还应说明灰场的位置、与电厂的距离和标高差、堆积容积和使用年限等。

2）除灰系统的选择。包括灰渣量计算结果、除灰系统拟定、除灰系统用水量和水源，以及除灰系统技术经济比较等。

a. 除灰系统的拟定应根据工程设计条件选择子系统，并分别进行论述。包括除灰渣系统、石子煤系统、石灰石粉制备和输送系统、煤泥输送系统等的工艺流程、系统出力及运行要求。

b. 除灰系统技术经济比较应论述各方案的特点，进行技术经济比较，并提出推荐意见。除灰系统技术经济比较应按各系统方案的占地面积、用水量、耗电量、系统可靠性、先进性、工作条件、对环境的污染以及对运行维护工作量的大小等方面进行比较。根据上述技术经济比较，提出方案推荐意见。

3）除灰设备选择及其布置。包括除灰设备选择和除灰设备布置。除灰设备选择是根据选择的除灰系统方案进行主要设备（除渣、除灰、除石子煤、石灰石粉、煤泥、气源等）的选型，并对设备的运行方式进行说明。除灰设备布置是对除灰系统主要设备的布置位置进行简述，并根据粉煤灰综合利用情况确定是否同步设置粉煤灰分选和磨细系统。

（3）根据工程需要编制的专题报告。

（四）施工图设计阶段

1. 司令图设计

司令图也称施工图原则总图。有些工程，特别是涉外项目，没有单独划分出司令图设计，而是一并称作施工图设计。但近几年来，各大发电投资商越来越重视司令图设计，不仅要分解成独立的阶段，而且还要专项评审。

司令图设计是为现场开工做准备的，也是整个项目施工图设计的前提和基础。司令图设计的重点是主厂房区域和全厂管网、管沟以及与外部接口布置等。

除灰专业司令图设计的任务主要是根据批准后的初步设计文件及审批文件、项目法人的设计委托书等，结合设计总工程师下发的项目计划大纲，对其进行修订、补充、深化，完成用于指导各卷册施工图设计的除灰专业施工图计划大纲、施工图卷册任务书和设备规范书，为除灰专业施工图的全面开展奠定基础，为设备的招标、厂区规划和相关专业工程量的确定提供

依据，并完成与其他专业的主要负荷和格局布置配合，如主要设施布置，主要厂区管道、管沟布置，主要电负荷，耗水量等。

2. 施工图设计

施工图设计成品用于现场施工，也是一个电站项目从概念变为现实的媒介，所以施工图成品的正确性、完整性、可实施性是衡量其质量的主要特性。

施工图设计阶段的最大特点是同时提供设计成品和服务产品。

施工图设计报告中除灰系统主要内容深度按DL/T 5461.5—2013《火力发电厂施工图设计文件内容深度规定》执行，主要内容如下：

（1）卷册图纸目录和施工图总说明。

1）卷册图纸目录包括卷册检索号，工程名称，设计阶段，专业名称，卷册序号，卷册名称，图纸及卷册内相关设计文件数量，卷册相关人员签署、版本号，卷册出版日期，卷册内每张图纸的图号、图名和相关信息等。

2）施工图总说明包括工程概述、设计依据、主要设计原则、设计范围、设计原始资料、系统设计说明、辅助设施、施工运行注意事项以及相关问题等。其中，系统设计说明包括除渣系统、除灰系统、除石子煤系统、灰库系统、气源系统、循环流化床锅炉石灰石粉制备和输送系统、循环流化床锅炉煤泥输送系统、粉煤灰分选系统以及部分辅助系统等，应说明系统设施型式、设备出力、运行方式，以及配套设施的情况；还包括除灰系统的控制，需说明除灰系统的控制方式、监控设备及控制地点等情况。

（2）标识系统设计说明、图纸及清单。标识系统设计说明、图纸及清单中的编码应符合GB/T 50549《电厂标识系统编码标准》的规定。标识系统设计说明应作为一个单独的卷册出版，除灰专业需根据具体项目所采用的标识系统方案，说明除灰渣部分标识系统编码的规则、设计文件中标识系统编码的具体内容和要求。

（3）设备与材料清册。包括统计汇总全厂设备，开列设备清册；统计汇总全厂材料和阀门，开列材料清册。

（4）系统流程及系统设施总布置图。包括除灰、除渣、除石子煤、灰库系统、气源系统、循环流化床锅炉石灰石粉制备和输送系统、循环流化床锅炉煤泥输送系统、粉煤灰分选系统等系统图；各辅助系统的系统图；系统设施总布置图等。

（5）设备布置安装图。包括炉底除渣设施布置安装图、灰渣浆（水）泵（房）布置安装图、浓缩机（澄清池、脱水仓）设备布置安装图、空气压缩机（气化风机、真空泵）设备布置安装图、气力输送设备布置安装图、灰库（渣仓、石灰石粉仓、石子煤仓）设备布置安装图、厂（内）外机械输灰渣设备布置安装图、石子煤输送设备布置安装图、石灰石粉制备和输送系统设备布置安装图、粉煤灰分选系统设备布置安装图，以及设备明细表、材料明细表等。

（6）管道布置安装图。包括灰、渣浆（水）管道布置安装图、飞灰输送管道布置安装图、干渣输送管道布置安装图、石子煤输送管道布置安装图、石灰石粉输送管道布置安装图、除灰渣系统用水管道布置安装图、排污水管道布置安装图、压缩空气管道布置安装图等。

## 三、除灰系统设计要求

### （一）总设计要求

除灰系统的设计和设备选型应满足安全可靠、技术先进、经济适用的要求，符合国家法律法规，执行国家、行业和企业的相关标准和规范，并满足节约能源和资源、环境保护以及循环经济等方面的要求。

系统设计要做好下列3个方面的工作：

1. 标准化设计

标准化设计是指从系统设计、设备和管道布置、设备和材料选型等方面，进行归纳梳理，制定标准化设计模块，实现系统设计规范化和标准化，提高设计效率和质量，也为采购、安装、运行维护提供便利。

2. 优化设计

优化设计是指在满足相关标准的前提下，确保系统安全可靠运行的基础上，开展系统设计优化工作。主要指在整个设计过程中，对于系统设计方案的选择、计算、设备选型、布置安装、运行维护等方面，围绕节能减排、节水、节约资源、环境保护及循环经济等方面开展优化工作等。

3. 精细化设计

精细化设计是指施工图设计阶段，在设备、设施及阀门和管道布置安装，以及材料选型等方面，对各分系统的设计进行一定的细致量化工作，尤其对小管径管道、支吊架材料和部件的合理美观布置、量化控制等方面的工作。

### （二）遵循的相关标准

火力发电厂除灰渣系统设计应符合现行国家标准和行业标准，包括但不限于如下标准：

GB 50660—2011《大中型火力发电厂设计规范》

GB 50049—2011《小型火力发电厂设计规范》

DL/T 5142—2012《火力发电厂除灰设计技术规程》

GB 50029—2014《压缩空气站设计规范》

JB/T 11649—2013《粉煤灰分选系统》

JB/T 11650—2013《循环流化床锅炉石灰石粉一

级输送系统》

GB 50764—2012《电厂动力管道设计规范》

DL/T 5032《火力大电厂总图运输设计技术规范》

DL/T 5054—2016《火力发电厂汽水管道设计技术规范》

DL/T 5204—2016《发电厂油气管道设计规程》

DL/T 5072《发电厂保温油漆设计规程》

DL 5053—2012《火力发电厂职业安全设计规程》

DL 5454—2012《火力发电厂职业卫生设计规程》

除灰渣系统设计还应遵守国家能源局下发的《防止电力生产事故的二十五项重点要求》，以及中国电力企业联合会组编的《火力发电工程建设标准强制性条文实施指南》。

（三）系统选择原则

在除灰系统设计中，系统的选择是重点之一，不仅要选出适用于本工程的系统，还需要在几种都适用的系统中选择最优的系统；此外，还要求考虑相关专业的综合影响，如热机、总平面、结构等专业，做到整体设计最优。系统选择不仅要求设计者有丰富的经验，还需要设计者有广阔的视野，对行业设计制造水平，电厂运行情况，新技术、新设备和新材料有较全面的了解。结合目前阶段设计水平，系统选择原则如下：

（1）除灰系统可采用气力、机械、水力输送系统或组合系统，宜符合下列规定：

1）固态排渣炉排渣宜采用机械除渣系统。

2）煤粉锅炉飞灰宜采用气力输送系统。

3）中速磨煤机石子煤宜采用简易机械输送系统；当条件适宜时，也可采用其他形式的输送系统。

4）采用干灰贮灰场时，灰渣、石子煤、石膏的厂外输送方式宜采用汽车运输方式。

5）采用湿式贮灰场时，灰渣厂外输送宜采用水力管道输送。

（2）在除灰渣系统设计中，若某些物料特性缺乏经验数据，或者实际物料特性与常规物料特性差异较大，或物料输送条件与常规条件差距较大，系统设计超出设计极限，或者需要采用新技术、新工艺融入系统设计时，应进行充分的研究和分析，必要时要开展科研项目进行攻关，取得审查单位、权威专家和运行单位的一致认可后，方可在工程设计中采用。

## 第二节 物料的特性

除灰系统物料的特性，尤其是物料的物理特性，是系统设计和优化设计的基础和依据，其中粉煤灰、渣、石子煤、石灰石粉等物料属于常规物料，统一进行说明，而循环流化床锅炉燃烧所需的煤泥，属于非牛顿流体，是指不满足牛顿黏性实验定律的流体，即其剪应力与剪切应变率之间不是线性关系的流体。该物料的特性详见《大型循环流化床锅炉附属系统设计》中煤泥输送系统章节的说明。

### 一、物料特性指标定义

粉煤灰、渣、石子煤、石灰石粉等物料是由很多大小不一的固体颗粒聚合在一起的松散物质，属于非单相物质。从表面上看，它似乎属于固体，但是其颗粒之间及颗粒表面的孔隙和缝隙中充满了气体，因此这些物料是由固体和气体组成的气固混合体，属于两相物质。

物料的特性通常分为物理特性和化学特性，通常由下列指标来表示：

（一）物理特性

1. 形态特征

通常由颜色、形状、结晶形式等表示。

2. 特性指标

（1）密度。

1）堆积密度。指在自然松散堆积状态下单位体积的干燥松散物料的质量。

2）真实密度。指物料质量与其真实体积之比。

3）实际堆积密度。指在自然松散堆积状态下单位体积的松散物料的实际质量。

4）气化密度。是专门针对飞灰层处于气化状态时定义的。当灰层在气化风的作用下处于气化状态时，体积膨胀，空隙率大大增加，此时单位体积飞灰的质量称为气化密度。

粉煤灰的气化密度小于堆积密度。在工程设计中，粉煤灰的气化密度应通过实测确定。当无法获得实测数据时，也可按0.75倍堆积密度确定。

（2）安息角。指散料从漏斗状小孔连续落到水平面上，形成一个圆锥体，这一圆锥体母线与水平面的内夹角。

（3）摩擦角。

1）内摩擦角。指物料沿料堆内部某一料层断面滑动时，形成的与水平面的夹角。

2）外摩擦角。指料层与固体壁面之间的摩擦角。

（4）粒径及级配。

1）粒径。对于燃煤电厂的粉煤灰等物料，粒径即颗粒的直径或等效直径。当被测颗粒的某一物理特性与某一直径的同质球体最相近时，就把该球体的直径作为被测颗粒的等效直径。

2）级配。指颗粒粒度分布域，常用的粒度分布参数有以下2种：

a. 质量频率分布。按照不同的粒径段将试样划分为若干个粒组，不同粒组内的试样质量称为组频

数，试样总质量为全频数。某个粒组的试样质量（组频数）占试样总质量（全频数）的百分比称为组频率，每个粒组的组频率即组成了该试样的质量频率分布。

b. 累计分布率。累计分布率分为筛上累计分布率（$D_i$）和筛下累计分布率（$R_i$）两种。所谓筛上累计分布率是指大于某一粒径试样的质量占试样总质量的百分比；筛下累计分布率恰好相反，即小于某一粒径灰样的质量占灰样总质量的百分比。由此可见，筛上累计分布率和筛下累计分布率是互补关系，即

$$D_i+R_i=100\% \tag{1-1}$$

3）表示粒径级配的其他特征参数。

a. 中位径（$d_{50}$）。一个样品的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径。它的物理意义是粒径大于它的颗粒占50%，小于它的颗粒也占50%，$d_{50}$常用来表示粉体的平均粒径。

b. 比表面积。指单位质量颗粒的表面积之和。

（二）化学特性

粉煤灰等物料的化学特性通常用化学成分全分析来表示，一般包括 $SiO_2$、$Al_2O_3$、$Na_2O$、$K_2O$、$CaO$、$MgO$、$TiO_2$、$Fe_2O_3$、$SO_3$ 及飞灰中可燃物含量等。

## 二、各种物料的形态特征及化学特性

（一）粉煤灰的形态特征及化学特性

1. 形态特征

粉煤灰中大部分颗粒是无定形的玻璃体和含量变化很大的碳，而结晶相则以莫来石和石英为主，此外还有少量磁铁矿、赤铁矿、方解石、长石、金红石等。

粉煤灰的外观类似水泥，在一般情况下，粗略地可从色泽的变化观察粉煤灰性质的变化。随着碳含量从低到高变化，低钙粉煤灰从乳白色变至灰黑色；高钙粉煤灰一般呈浅黄色，可反映氧化钙的含量。

根据电厂燃煤煤质和炉型不同，我国的粉煤灰大致可划分为以下三种，三种粉煤灰在矿物组成及物理特性指标上的差异见表1-2、表1-3。

（1）煤粉炉燃用高热值煤（大于16800～18900kJ/kg）产出的低钙普通粉煤灰。

（2）燃用低热值燃料（洗煤矸、煤泥、劣质煤、石煤、油页岩等），由循环流化床锅炉低温（850～950℃）烧出（不添加石灰石）的流化床粉煤灰。

（3）在炉内加脱硫剂（如石灰石粉）与燃料共烧，产出的脱硫灰渣及部分由褐煤及次烟煤直接烧出的高钙粉煤灰（CaO含量大于20%）。

表1-2 三种粉煤灰在矿物组成上的差异

| 灰样 | 不定型玻璃体 | 结晶相 | 脱硫相 |
|---|---|---|---|
| 普通煤粉炉灰 | 60%以上 | 以莫来石和石英为主 | 无 |
| 循环流化床灰（不添加石灰石） | 50%～60%。表面不光滑，不规则 | 无莫来石，过渡矿物较多 | 无 |
| 循环流化床灰（添加石灰石） | 50%～40%（±）。表面不光滑，不规则 | 无莫来石，在总量中比重有增加 | 有，约占灰总量的1/3 |

表1-3 三种粉煤灰在物理特性指标上的差异

| 灰样 | 细度（45μm方孔筛余） | 需水量比 | 颗粒形状 | 自硬性 | 安定性 | 有无应用标准 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 普通煤粉炉灰 | 小于12%～45% | 小于95%～115% | 光滑、和易性好 | 无 | 较好 | 有 |
| 循环流化床灰（不添加石灰石） | 多大于80～100μm | 120%～140%或≥140% | 粗糙 | 无 | 较好 | 无 |
| 循环流化床灰（添加石灰石） | 多大于100μm | ≥140% | 粗糙、和易性差 | 有 | 差 | 无 |

表1-2和表1-3中物料的差异，主要是由于循环流化床锅炉与煤粉炉燃烧工艺不同，煤粉炉一般是将燃煤磨制成粒径约1～300μm的细煤粉，而循环流化床锅炉则取消了煤粉锅炉的制粉系统，仅将燃煤细碎成粒径为0～8mm的煤粒，因此，燃煤灰渣的粒径大小和分布范围有所区别。

2. 化学特性

粉煤灰的化学成分主要为氧化硅、氧化铝，两者总含量一般在60%以上。有些原煤成分特殊，其粉煤灰的氧化钙含量在8%以上；有些原煤中黄铁矿含量很高，致使粉煤灰中 $Fe_2O_3$ 含量较高。

如前所述，3种不同类型的粉煤灰在化学组成上的差异见表1-4。

表 1-4　　3 种不同类型的粉煤灰在化学组成上的差异　　(%)

| 灰样 | | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | $Na_2O$ | $SO_3$ | $CO_2$ | $TiO_2$ | MgO | MnO | $P_2O_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 普通煤粉炉灰 | | 50.6 | 27.2 | 7.0 | 2.8 | 1.3 | 0.5 | 0.3 | — | — | 1.2 | — | — |
| 循环流化床灰（不添加石灰石） | | 48.423 | 25.396 | 6.147 | 3.991 | 1.414 | 0.617 | — | — | 1.037 | 1.367 | 0.591 | 0.158 |
| 循环流化床灰（添加石灰石） | 灰 | 35.19 | 11.253 | — | 26.255 | — | 0.383 | 5.758 | — | — | 1.075 | — | — |
| | 渣 | 33.778 | 15.035 | — | 21.698 | — | 0.16 | 9.318 | — | — | 1.645 | — | — |

碳粒尽管不属于粉煤灰的化学成分，但却是粉煤灰极重要的物质组分。由于锅炉炉型或燃烧工况的不同，飞灰中或多或少地残留一部分未燃尽的碳粒。这不仅造成了煤炭资源的浪费，而且还在不同程度上影响粉煤灰的综合利用价值。通常普通煤粉炉燃烧烟煤时飞灰含碳量小于 3%，燃烧无烟煤时飞灰含碳量小于 8%；循环流化床锅炉飞灰含碳量小于 10%，主要原因是循环流化床锅炉的燃烧温度一般为 850～900℃，比煤粉炉的 1200～1400℃要低，因此飞灰中含未燃尽的碳比例高。

由于循环流化床机组燃烧过程中一般需加入石灰石粉等固硫组分，因此，灰渣中的 CaO 和 $SO_3$ 含量一般均较高。

（二）渣的形态特征及化学特性

1. 形态特征

炉渣的矿物组成主要有钙长石、石英、莫来石、磁铁矿和黄铁矿、大量含硅玻璃体（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$）、活性 $SiO_2$、活性 $Al_2O_3$ 及少量的未燃煤等。

炉渣的粒度与燃用煤质及锅炉燃烧情况有关，也与结渣特性有关。

煤粉燃烧过程中，残留的灰粒在炉膛高温气氛条件下，可能黏附于受热面及炉壁形成结渣，煤灰的结渣特性与煤中含硫及矿物质、灰熔融特性（灰熔点及灰黏度）等因素有关，也与燃烧过程有关。

国内锅炉燃煤煤质变化大，煤质一般均有不同程度的结渣性，由于各项目炉渣的结渣性差异较大，当锅炉结渣程度很低时，渣呈现细颗粒状；而当锅炉结渣程度严重时，渣块直径可达 1～2m。

一般情况下，可从色泽的变化粗略观察炉渣性质的变化。随着碳含量从低到高，炉渣从灰色变至灰黑色；高钙炉渣呈浅黄色，可反映氧化钙的含量。

2. 化学特性

煤粉炉渣的成分与粉煤灰化学成分相同。

（三）石子煤的形态特征及化学特性

1. 形态特征

石子煤通常由碾磨过的煤矸石、煤粉颗粒和石块组成，直径从几毫米到几十毫米不等。我国各发电厂采用的煤种各异，导致石子煤特性差异较大，如热值和含硫量，但通常密度和硬度均较高，这表明石子煤中乃至原煤中存在着较多的石块。

石子煤的色泽与煤的色泽基本相同。

2. 化学特征

石子煤化学成分见表 1-5。

表 1-5　　石子煤化学成分（质量比）　　(%)

| 化学成分 | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | $Na_2O$ | $SO_3$ | $CO_2$ | $TiO_2$ | MgO | MnO | $P_2O_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 33.82～53.84 | 17.09～32.71 | 7.16～33.47 | 1.50～4.02 | 0.65～2.15 | 0.48～1.00 | 0.90～4.18 | 0.10～0.29 | 0.74～1.48 | 0.15～0.99 | — | — |

由表 1-5 可知，石子煤中灰分的质量百分比非常高，其中 $SiO_2$、$Al_2O_3$、$Fe_2O_3$ 的含量最高，这表明石子煤中乃至原煤中铁、铝的含量较高，也是石子煤密度和硬度均较高的主要原因。

（四）石灰石（粉）的形态特征及化学特性

1. 形态特征

石灰石是由碳酸钙组成的沉积岩，主要矿物组成是方解石，并含有白云石、硅质、含铁矿物质和杂质。由于碳酸钙随着时间的变迁发生重结晶，依重结晶过程进行的条件可生成晶体分散度不一的岩石，形成时间越久，石灰石越致密而坚硬；形成时间越短，结构越松软。因此，石灰石的化学成分、矿物组成及物理性质变动极大。

石灰石色泽一般为浅灰、深灰色，含杂质多时颜色会发生改变。

石灰石块的大小、形状与矿山开采设备有关，通常循环流化床炉内所需脱硫石灰石粉颗粒最大直径小于 1.5mm。

2. 化学特征

石灰石随时间变迁，其化学成分变动较大，石灰石一般分为高钙石灰石（$CaCO_3$的含量大于95%）、高镁石灰石（$CaCO_3$含量为80%～90%；$MgCO_3$含量为5%～15%）和白云石（$CaCO_3$含量为50%～80%；$MgCOa_3$含量为15%～45%）。

石灰石不溶于水，易溶于酸，能与各种强酸发生反应并形成相应的钙盐，同时放出$CO_2$。石灰石煅烧至850℃以上时分解转化为石灰（CaO），放出$CO_2$，是循环流化床锅炉炉内脱硫的掺烧物。

## 三、物料特性指标

我国各火力发电厂采用的煤种及石灰石各异，加之采用的炉型不同，产生的各种物料特性变化较大，各种物料物理特性指标范围初步统计见附录B，供设计参考。

# 第三节 灰渣综合利用

我国的发电能力连年增长，燃煤电厂每年排放的灰渣总量也在逐年增加，其作为燃煤电厂燃烧的副产物，以前常作为废弃物存储于灰场，占用了大量土地，同时，给国民经济建设及生态环境造成了巨大的压力。

随着产业政策的调整，环境保护意识的增强及科技进步，电厂灰渣不再作为废弃物丢弃，而是通过开发，将灰渣综合利用起来，这不仅节约了土地资源，更保护了环境，而且还给电厂创造了可观的经济效益。

## 一、粉煤灰综合利用

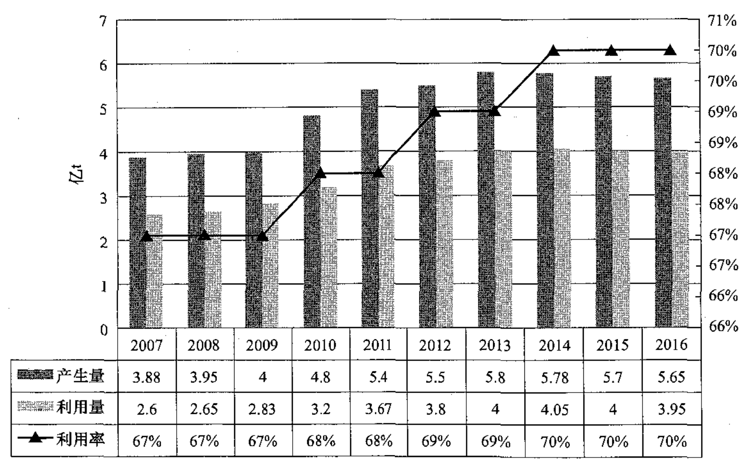
1. 粉煤灰综合利用的发展历程

在我国，粉煤灰综合利用的发展共经历了四个阶段，第一阶段，以储为主的阶段。在20世纪60～70年代，电厂粉煤灰基本上全部是运输至贮灰场填埋，贮灰场设计是按100%灰渣量，储存年限也是按电厂年限设计，此时灰渣综合利用属于起步阶段。第二阶段，储用结合阶段。到20世纪80年代，我国开始逐渐将粉煤灰应用于建筑工程、道路建设等方面。粉煤灰主要用于部分替代黏土制备砖、砌块等墙体材料。大部分电厂除灰系统设计仍然考虑100%运输至贮灰场能力，贮灰场设计仍然是按100%灰渣量的储存年限考虑，同时也为少量灰渣的综合利用创造条件。第三阶段，以用为主阶段。在20世纪80年代以后，在建筑材料领域、建筑工程领域、筑路回填领域以及农业应用领域，粉煤灰的资源化利用工作全面铺开，电厂除灰系统设计，其粉煤灰运输以综合利用为主考虑，不足部分考虑运输至贮灰场，贮灰场设计规模和容量也需根据综合利用而定。第四阶段，全面应用阶段。从2013年3月1日起，我国实施以国家发改委、科技部、财政部等10部委颁布实施《粉煤灰综合利用管理办法》（国家发改委〔2013〕19号令），其中规定所有新建电厂除灰系统设计须按100%灰渣综合利用考虑，通常电厂运行时灰渣不考虑运输至贮灰场储存，只允许考虑1年的事故贮灰场，不允许湿排粉煤灰等。从2013年起，落实灰渣100%综合利用及相关协议，已成为项目申报审查的必要条件之一。

2. 粉煤灰综合利用现状

粉煤灰综合利用率由1994年的35%提高到2013年的69%，“十五”时期以来，粉煤灰产生量急剧增加，由2001年的1.54亿t增加到2011年的5.4亿t，增长了3.1倍，“十一五”期间粉煤灰综合利用率基本保持在67%左右，“十二五”期间粉煤灰综合利用率基本保持在70%左右。

我国粉煤灰综合利用现状参见图1-1。




| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 产生量 | 3.88 | 3.95 | 4 | 4.8 | 5.4 | 5.5 | 5.8 | 5.78 | 5.7 | 5.65 |
| 利用量 | 2.6 | 2.65 | 2.83 | 3.2 | 3.67 | 3.8 | 4 | 4.05 | 4 | 3.95 |
| 利用率 | 67% | 67% | 67% | 68% | 68% | 69% | 69% | 70% | 70% | 70% |

注：数据来源为国家发改委、中国电力企业联合会、中国循环经济协会，2015年和2016年数据为估计值。

图1-1 我国粉煤灰综合利用现状

3. 综合利用途径和比例

目前，我国粉煤灰资源化利用主要涉及建材制品、道路工程、填充材料、农业等多个领域。

粉煤灰综合利用途径比例参见图 1-2。

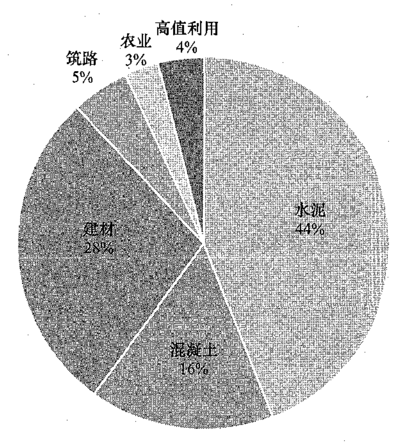



图 1-2　粉煤灰综合利用途径比例

## 二、除灰系统常用配套设计方式

除灰系统设计时，应根据项目灰渣综合利用情况，充分进行设计配合工作，给综合利用创造良好的条件，通常除灰系统有如下配套设计方式：

1. 预留条件

通常在灰库系统设计时，预留出上粉煤灰分选系统的条件，也就是在灰库顶、灰库侧灰库卸料口、灰库运转层和 0m 地面等处，预留出布置粉煤灰分选系统的设备、管道等布置空间，并且要在电负荷和土建荷载上做相应考虑。

2. 同步设置粉煤灰分选系统

粉煤灰分选系统通常是将灰库收集的粉煤灰，采用闭式气力分选系统进行分选，将粉煤灰中细灰（国家Ⅰ级或Ⅱ级灰标准）与粗灰分离出来，分别进入成品库和粗灰库储存，再按质进行外运销售。目前，粉煤灰分选系统按分级机类型划分有蜗壳式气力分选系统和涡轮式气力分选系统 2 种，前者单套系统出力一般在 60t/h 以内，而后者单套系统出力一般在 200t/h 以内。

# 第二章

# 气 力 输 送 系 统

气力输送是利用空气等气体作为输送介质和动力，在管道中进行固体粉粒状物料输送的一项技术。火力发电厂气力输送系统通常用于输送锅炉尾部排出的粉煤灰，简称气力除灰，近年来也用于输送锅炉底渣、脱硫石灰石粉等物料。

气力输送系统主要由输送设备、输送管道和控制系统等组成。输送设备将飞灰等物料与输送气体混合后喂入输送管道，在管道内利用气体压力释放、膨胀形成的动力将物料输送至储存系统。气力输送的辅助系统主要包括提供输送气体的气源系统和物料储存系统。

气力输送系统主要分为正压气力输送系统和负压气力输送系统两大类。空气斜槽及气力提升泵系统、粉煤灰分选系统也属于气力输送的范畴，由于其输送原理、功能及应用范围等各具特点，本章予以单独阐述。

## 第一节 基 本 概 念

采用气力输送灰、渣等粉粒状物料是保持物料物理化学特性较为理想的输送方式之一。在设计过程中，根据物料特性和输送条件，保证管道内物料最佳输送流态是设计好气力输送系统的关键。

### 一、与输送有关的物料特性

气力输送试验和工程实际经验表明，影响气力输送的物料特性分为两类：①物料的基本特性，主要包括粒度、外形、实际堆积密度和外在水分等；②物料与气体相结合时的特性，主要包括存气性、去气性和透气性。

### 二、气力输送的流动模式

在常规气力输送系统中，对不同特性的散料进行气力输送时，管道中一般可观察到三种流动模式：

（1）从稀相平稳转换到流态化密相（浓相），此模式在管道中通常呈现均匀流、管底流、疏密流等流态，一般适用于细粉（如粉煤灰、水泥、煤粉等）。

（2）稀相、不稳定区及栓流。此模式在管道中通常呈现均匀流、集团流、部分流和柱塞流等流态，一般适用于轻而自由流动的颗粒料（如塑料切片、小麦、大米等）。

（3）纯稀相。此模式在管道中通常呈现均匀流的流态，一般适用于重而粒径分布宽的颗粒（如碎煤、原生精矿、锆砂、底渣、省煤器粗灰等）。有些轻的、纤维状或海绵状物料（如木片、谷物屑、锯屑、甘蔗渣、珍珠岩等），也只能以稀相输送。

在上述三种流动形式中，其输送性能存在大的差异。这些差异能较大影响到气力输送系统的设计、设备选型及运行。而物料输送的流动形式完全取决于相关的料性，国际上一般以通用的散料气力输送模式分类图来进行物料的分类，参见图 2-1。

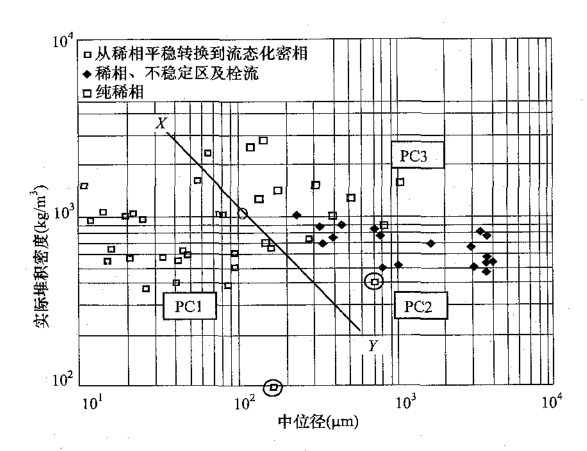



图 2-1 散料气力输送模式分类图

图 2-1 仅以物料的实际堆积密度和中位径来表示物料特性，常规气力输送的散料可分为三组（PC1、PC2 及 PC3）。PC1 组中的散料（如飞灰、水泥、粉煤等）可以流畅而平稳地从稀相到流态化密相输送。PC2 组的散料（如塑料切片、小麦、大麦等）可以以稀相、不稳定区或栓流来输送。而 PC3 组的散料（如原生精矿、锆砂等）只能以稀相输送。

由图 2-1 可知，细粉和粗粒料的输送流态是不同的。细粉料能够流畅而平稳地从稀相到流态化密相输送。粗粒料则以纯稀相或稀相、不稳定区及栓流的流动形式输送，这取决于它们的粒子/散料性能。通常取 $d_{50}\rho_d=0.1206\text{kg/m}^2$ 作为分界点，其中 $d_{50}$ 为中位径（m），$\rho_d$ 为实际（松散）堆积密度（$\text{kg/m}^3$）。

在输送中，作用在料栓上的摩擦力直接与实际堆积密度有关，并随后者的增大而急剧增加。因此，由于摩擦力大，堆积密度大的散料不可能以栓流输送，而需要高的气体流速来使粒子悬浮（即只能选择低浓度稀相）。当堆积密度超过 $1000\text{kg/m}^3$ 时，散料就不能采用栓流气力输送。

在纯稀相输送中，当空气流速不足以快到使粒子悬浮时，粒子开始沉降并很快沿着管道底部堆集。一旦物料完全充填一段管道，堵塞立即发生。然而在栓流输送中，管道在一个或数个截面处被粒子充满，而粒子仍能沿管道以料栓输送。所以对于散料选择栓流或纯稀相输送，取决于作用在管道中形成的料栓上的推动力与阻力之间的关系。如果推动力永远不超过阻力，那就不得不降低输送浓度，避免形成栓塞；反之，散料就能以栓流输送。

## 三、物料特性的准确性与系统设计的关系

由以上分析可知，对于不同的物料，气力输送在管道内呈现的流态是不同的。例如，电厂粉煤灰、水泥等密度适中的细粉物料，稀相输送和浓相输送均可采用；重而粒径分布宽的颗粒，如锅炉底渣、石灰石粉、石子煤等，只能采用稀相输送。

同一种物料，在不同的工程条件下，其气力输送的设计参数是不同的。例如，同样一种粉煤灰，当输送出力、距离不同时，其管道内的流态也是不相同的，进而所设计系统的参数也是不相同的。

因此，物料特性的准确性是决定气力输送设计是否正确的关键。在气力输送系统的设计中，应采用条件相近工程的成熟运行经验和数据。未取得成熟运行经验时，应进行物料基本特性、输送特性的试验研究和技术论证。

# 第二节　正压气力输送系统

正压气力输送系统是利用压缩空气作为输送介质和动力进行物料输送的系统，压缩空气由空气压缩机或正压风机提供，其功能是将粉煤灰等物料从排放点集中输送至储存系统。正压气力输送系统由供气管道、受料输送装置、输送管道、收尘设备和控制系统等组成，辅助系统有气源系统、物料储存系统等。

正压气力输送系统在工程应用中可分为气锁阀系统和仓泵输送系统两种。

## 一、气锁阀系统

气锁阀系统也称为低正压气力输送系统，是指采用回转式风机产生的低压空气作为输送气源，气锁阀作为输送设备的正压气力输送系统，其属于一种稀相悬浮流输送。一般用于火力发电厂锅炉省煤器、空气预热器和除尘器飞灰等的集中输送。

### (一) 设计要求

系统及布置设计的要求如下：

（1）每台锅炉宜设计一套气锁阀输灰系统，系统的设计出力应不小于锅炉最大连续蒸发量工况、燃用设计煤种时排灰量的 150%；同时应不小于燃用校核煤种时排灰量的 120%。

（2）气锁阀系统的设计输送距离一般不宜超过 1000m，单根管道的设计出力不宜超过 80t/h。

（3）当输灰系统设有分支管时，每一分支管道上的气锁阀数量不宜超过 10 个。在每个分支管接入母管处应设气动切换阀。

（4）系统中每一分支管的空气输送管上应设有一个孔板，孔板的孔径按输送管道和平衡管道之间的压差为 7kPa 来确定。

（5）当系统设有一个以上的分支管道时，在空气管（平衡管后）到每一分支管的水平管段上应设有一个弹簧止回阀，以防止带灰气流倒流入平衡管内。

（6）采用气锁阀除灰系统时，每个除尘器灰斗下装设一套气锁阀。为方便检修，气锁阀与灰斗之间应装设一个手动隔离阀。

（7）气锁阀一般采用地上布置，其底部与地面的净空距离满足底阀等的检修要求。在气锁阀顶阀处宜设有检修维护平台。

（8）当锅炉采用电除尘器时，气锁阀输灰系统的分支管道一般与烟气的流动方向垂直布置，即同一电场灰斗的气锁阀串接在一根分支管道上输送。

（9）气锁阀的排气平衡管道宜就近接至灰斗的高料位以上区域，排气管道与水平面的夹角不小于 55°。

（10）气力输灰管道的设计要求如下：

1）气力输灰管道的直管段宜采用碳钢管，其壁厚不宜小于 7mm。弯头及管道附件应采用耐磨材料。

2）气力输灰管道应尽量平、直、短布置，并减少弯头数量；应尽量采用水平＋垂直向上布置，避免向下和倾斜布置；尽量避免 U 形布置。弯头转弯半径宜为管道直径的 3～6 倍。

3）灰管在灰斗出口处或需改变方向时，在拐弯前宜有不小于 10 倍管径的直管段；灰管变径点距弯头的距离不宜小于 6m。

4）气力输灰管道宜采用架空布置。当采用地面

布置时，通行处应设跨越步道；当采用架空布置时，与铁路、公路、建筑物及高压线间的距离应符合 DL/T 5032《火力发电厂总图运输设计技术规范》和 DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》等的要求。

5）为适应热胀冷缩的要求，气力输灰管道宜尽量采用自补偿设计；如灰管直管段过长，自补偿不能满足要求，宜加设补偿器。

（二）设计计算

1. 计算原始资料

（1）灰量。

（2）灰的物理性能，包括粒径、实际堆积密度等。

（3）工程当地气象条件，包括平均气压、平均气温等。

（4）输送条件，包括系统形式、运行方式、输送几何距离、高差和弯头数量等。

2. 系统基本数据计算

（1）系统设计出力。气锁阀输灰系统的设计出力 $G$(t/h)按式（2-1）计算

$$G=G_h\times 150\% \tag{2-1}$$

式中　$G_h$——系统对应的锅炉设计工况下排灰量，t/h。

（2）管道输送距离参数。系统有关的输送管道距离参数包括：①输送管道的几何长度 $L$（m）；②管道的垂直升高 $H$（m）；③90°弯头个数 $N$（当弯头小于 90°时，折算为 90°弯头）。

（3）输送灰气比$\mu$。指系统输灰质量与输送空气质量的比值，它与输送距离、灰的特性等有关。一般输送距离越长，灰气比越小。为了便于系统计算，一般先按以下经验数据选取，复核计算后修正。

对于气锁阀系统，$\mu$=10～25kg/kg。

（4）输送系统所需的空气质量流量。空气质量流量 $q_m$（kg/min）按式（2-2）计算

$$q_m=\frac{G}{\mu}\times\frac{1000}{60}=16.67\frac{G}{\mu} \tag{2-2}$$

式中　$G$——系统设计出力，t/h。

在标准状态下空气的体积流量 $q_0$（m³/min）可按式（2-3）计算

$$q_0=\frac{16.67G}{\rho_0\mu}=\frac{16.67G}{1.293\mu}=12.89\frac{G}{\mu} \tag{2-3}$$

管道任意点的体积流量 $q_V$（m³/min）按式（2-4）计算

$$q_V=\frac{12.89Gp_0(273+t)}{\mu p\times 273} \tag{2-4}$$

式中　$G$——系统出力，t/h；

$\rho_0$——在标准状态下（0℃，$1.0133\times10^5$Pa）的空气密度，$\rho_0$=1.293kg/m³；

$p_0$——在标准状态下大气的压力，$1.0133\times10^5$Pa；

$p$——管道任意点的绝对压力，Pa；

$t$——管道任意点处的温度，℃。

（5）气灰混合物温度。气锁阀系统国内外比较先进的计算方法是能量法计算法，假定管道内的气体流动与外界不存在热交换，将输送近似考虑为定温绝热过程。

（6）输送速度。气力除灰的输送速度一般应根据物料输送试验来确定，由于气锁阀输送系统中干灰在输送管道内属悬浮输送，因此输送管道起始流速应大于被输送物料的悬浮速度。根据国内外有关试验研究资料和工程经验，气锁阀系统管道输送初始速度推荐采用 10～12m/s，输送末端速度宜控制在 25m/s 以内。如果输送管道较长，为降低流速，需将管道分为几段，管径逐段放大。输送管道计算点的空气流速 $v$（m/s）可按式（2-5）核算

$$v=\frac{4q_V}{60\pi D^2}=0.0212\frac{q_V}{D^2} \tag{2-5}$$

式中　$D$——计算管道的内径，m；

$q_V$——管道计算点的空气体积流量，m³/min。

（7）输送管道管径。输送管道的管径 $D$（m）可按式（2-6）计算

$$D=0.1457\sqrt{\frac{q_V}{v}} \tag{2-6}$$

式中　$v$——计算点空气流速，m/s。

3. 气锁阀容积计算

气锁阀的容积可按式（2-7）和式（2-8）计算：

（1）单个气锁阀排放

$$V=\frac{Gt}{3600\rho_d kE} \tag{2-7}$$

（2）多个气锁阀排放

$$V=\frac{G[t+0.4t(n-1)]}{3600\rho_d kEn} \tag{2-8}$$

式中　$V$——气锁阀容积，m³；

$G$——输送系统出力，t/h；

$\rho_d$——灰堆积密度，t/m³；

$k$——在气化状态下灰堆积密度系数，可取 0.75；

$n$——气锁阀同时排放个数；

$E$——系统效率系数，考虑气锁阀部分充满及管道吹扫的影响，可按表 2-1 选取；

$t$——气锁阀底闸门开启时间，可参照表 2-2 选取。

表 2-1　　系 统 效 率 系 数

| 气锁阀排放个数 $n$（个） | 1 | 2 | 多个 |
|---|---|---|---|
| 系统效率系数 $E$ | 0.8 | 0.85 | 0.9 |

表 2-2　　气锁阀底闸门开启时间

| 气锁阀容积 $V$（m³） | 0.7 | 1 | 1.42 |
|---|---|---|---|
| 气锁阀底闸门开启时间 $t$（s） | 25 | 30 | 40 |

4. 气锁阀系统的输送出力计算

气锁阀系统的管道输送出力可根据能量守恒原理进行计算，系统将物料从输送管道始端输送至末端，该输送管段的出力可按式（2-9）计算

$$G=\frac{q_V}{v_b}\cdot\left(\frac{p_bv_b-p_ev_e}{\kappa-1}\right)\times\frac{3.6}{\left(\dfrac{v^2}{2g}+Lf+H+\dfrac{v^2fN\pi}{2g}\right)g} \tag{2-9}$$

式中　$G$——系统输送出力，t/h；

$q_V$——始端空气体积流量，m³/s；

$v_b$——始端空气比体积，m³/kg；

$v_e$——末端空气比体积，m³/kg；

$p_b$——始端空气绝对压力，Pa；

$p_e$——末端空气绝对压力，Pa；

$\kappa$——等熵指数，可取 1.2；

$v$——输送管段平均流速，m/s；

$g$——重力加速度，9.81m/s²；

$L$——输送管段的几何长度，m；

$f$——摩擦系数，当管道直径 $D\leqslant200$mm 时，$f=0.7$，当 $D\geqslant200$mm 时，$f=1.1-0.002D$［这是一个经验计算方法，计算直接代入 $D$（mm）数值进行计算］；

$H$——垂直升高，m；

$N$——90°弯头个数，当弯头小于 90°时，折算为 90°弯头。

5. 压力损失计算

气锁阀系统的压力损失是从输送管道的末端（即入库的接口处）向管道起始端逐段进行计算的，由以下各部分组成：

（1）管道压力损失$\Delta p_L$。对于气锁阀系统输送管道的压力损失，可先计算出管道末端（即入库的接口处）的压力 $p_e$，并在已知管道设计出力和各段管段设计参数的情况下，按式（2-9）进行反复试算，即根据经验，假定各管段长度、始端压力，反复试算直至管道出力和输送流速等满足要求为止，最终可算出各管段始端和末端的绝对压力，从而得出各段管道的压力损失。由于人工手算过程比较繁琐，可通过“稀相气力输送系统计算软件”进行计算。

以前部分工程的气锁阀系统也按仓泵稀相正压系统的压力损失公式进行计算，即按式（2-22）进行计算，计算结果与实际相比偏大，特别是在输送距离超过 1000m 时，偏差更大。因此，不建议采用式（2-22）进行计算。

（2）加料设备的压力损失$\Delta p_P$。气锁阀由下料室加料，其压力损失$\Delta p_P$ 应按制造厂家提供的数据选取；当没有厂家数据时可按 2000～3000Pa 考虑。

（3）入库压力损失$\Delta p_0$。

入库压力损失$\Delta p_0$（Pa）可按式（2-10）计算

$$\Delta p_0=\frac{\rho_e v_{e_0}^2}{2}(1+0.64\mu) \tag{2-10}$$

式中　$\rho_e$——管道末端空气密度，kg/m³；

$v_{e_0}$——管道末端空气流速，m/s；

$\mu$——输送灰气比，kg/kg。

式（2-10）中所有参数均选用气灰混合物入库处的数值，据工程实测，$\Delta p_0$ 一般为 3000～5000Pa。

（4）布袋除尘器的压力损失$\Delta p_f$。一般根据制造厂家提供的有关压力损失数据选用，没有厂家数据时可按 1000～1500Pa 考虑。

（5）气锁阀除灰系统的压力损失$\Delta p$。计算公式如式（2-11）

$$\Delta p=\Sigma\Delta p_L+\Delta p_P+\Delta p_0+\Delta p_f \tag{2-11}$$

式中　$\Sigma\Delta p_L$——各计算管道段压力损失的总和，Pa。

在国内电厂的稀相气力输送系统计算中，以前采用的人工计算方法较为复杂和繁琐。特别是输送管道需变径分段为 2 段以上时，需分段逐步计算，再核对结果。如结果通不过，需修改数据，反复试算，直到合格为止。

现在参考实际工程的计算资料，电力设计行业内开发了“稀相气力输送系统计算软件”，适用于气锁阀和负压气力除灰系统。程序采用能量法计算管道阻力和输送出力，将气力输送近似地考虑为定温绝热过程，大大简化了计算，而计算结果与实际情况比较吻合，提高了计算效率和准确性。

（三）设备选型

气锁阀系统的主要设备包括气锁阀和输送风机。

1. 气锁阀

气锁阀是输送系统的受料和输送设备。它是一种利用重力将灰或其他粉体物料，从其上方的微负压灰斗排入罐体，短暂储存后，喂入下部低正压输送管道的设备。在每个排灰斗下安装一只气锁阀。

（1）结构。气锁阀的典型结构参见图 2-2。

气锁阀通常由上料室、下料室、气动顶阀、气动底阀及三通平衡阀等组成。底阀连接上料室和下料室，而下料室的出料口与输灰管道是开放连接的。三通平衡阀的作用是通过切换相应的管路对上料室交替加压和泄压。在上料室的锥体部分，设有气化装置，以提高灰的流动性，防止在其锥部堵灰。气动顶阀和气动底阀的闸板由气缸操纵的拐臂和轴带动旋转。轴穿过盖板，

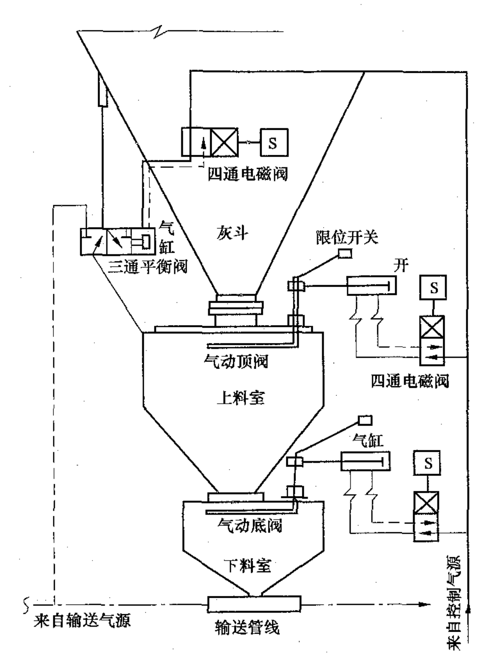



图 2-2　气锁阀的典型结构图

气缸装在闸板外面，便于检修和更换。轴通过其方形的端部带动闸板，板弹簧装在闸板下面施压，使闸板贴合在阀座上。阀座由陶瓷制成，具有很高的耐磨损性，可以更换。在上料室和下料室的侧面均设有检修用手孔门。

（2）主要技术数据。用于飞灰输送的常用气锁阀主要技术数据见表 2-3，供设计选型时参考。

**表 2-3　　常用气锁阀主要技术数据**

| 参　　数 | 型　　号 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0.4（常温型） | 0.7（常温型） | 1.0（常温型） | 0.7（高温型） |
| 输送物料 | 粉煤灰（粉状物料） | | | |
| 有效容积（$m^3$） | 0.4 | 0.7 | 1.0 | 0.7 |
| 设计压力（MPa） | 0.24 | | | |
| 物料温度（℃） | <150 | | | 350 |
| 控制气源压力（MPa） | 0.4～0.6 | | | |
| 最大工作压力（MPa） | 0.2 | | | |
| 质量（kg） | 720 | 770 | 820 | 770 |

2. 输送风机

输送风机一般采用高压罗茨风机，其结构和选型详见本书第五章第三节。

（四）系统图

典型的气锁阀输灰系统图参见图 2-3。

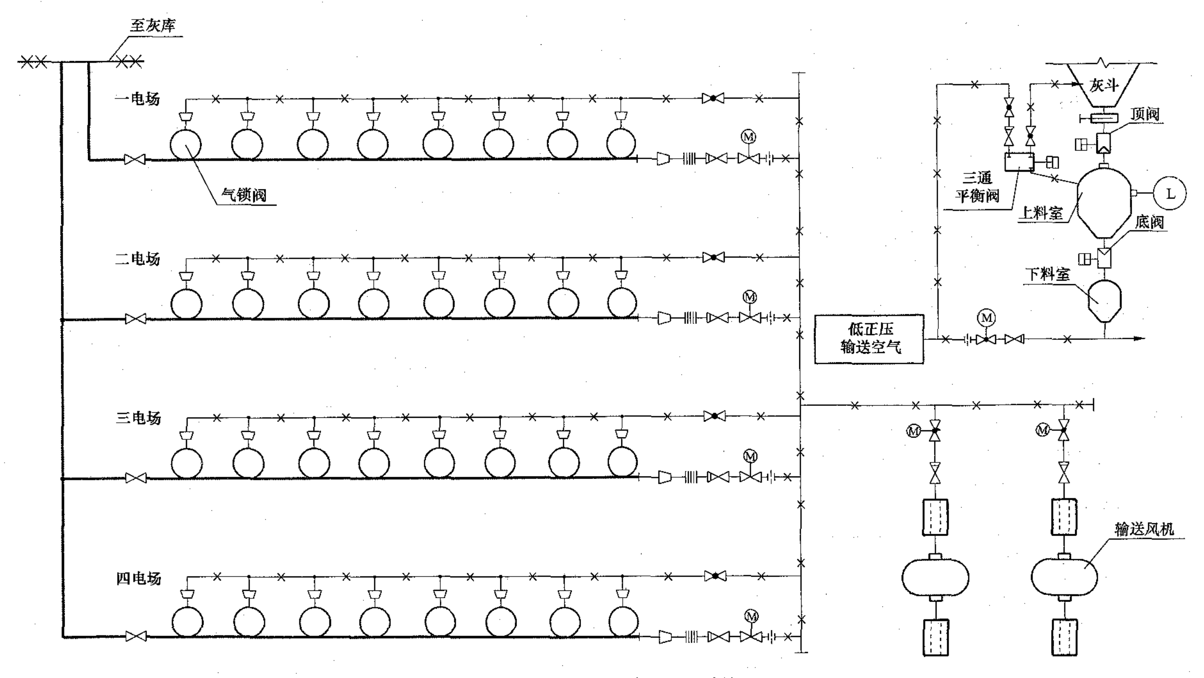



图 2-3　典型的气锁阀输灰系统图

（五）计算举例

以下举例说明气锁阀气力输送系统的计算，供工程项目设计时参考。

某 600MW 工程 1 台锅炉电除尘器飞灰采用一套气锁阀气力输送系统，设计原始资料和系统计算如下：

（1）计算原始资料（一台炉）：

1）输送物料：普通煤粉炉电除尘器飞灰，堆积密度为 $0.7t/m^3$；

2）设计灰量：$G_h$=29t/h；

3）灰斗数：每电场 8 个，共 32 个；

4）输送距离：水平距离为 500m，垂直升高 $H$=28m，90°标准弯头为 9 个，非标准弯头数为 0；

5）当地气象条件：平均气温 $t_a$ 为 20℃，大气压 $p_a$ 为 100000Pa。

（2）系统出力 $G$。系统出力按式（2-1）计算

$$G=150\%\times29=43.5\ (t/h)$$

（3）输送管道距离参数。管道水平长度 $L$=500m；垂直升高 $H$=28m；90°弯头 $N$=9。

（4）输送灰气比 $\mu$。由于该工程输送距离较长，按经验选取，暂定 $\mu$=10kg/kg。

（5）输送系统所需的空气量（标准状态下）。输送空气量按式（2-3）计算

$$q_0=12.89\times43.5/10=56.1\ (m^3/min)$$

（6）输送速度。输送初速确定为 $v_b$=12m/s。

（7）输送管道管径。按输送管道分为两段考虑，先以入库点参数试算第 2 段管径。

入库点绝对压力

$$p_e=p_a+\Delta p_0+\Delta p_f=100000+5000+1500=106500\ (Pa)$$

入库点绝对温度，为简化计算，管内温度按常温考虑

$$T_e=273+20=293\ (K)$$

按式（2-4）计算入库点空气流量

$$q_e=56.1\times293\times10336/(273\times10650)=58.4\ (m^3/min)$$

假定入库点空气流速 $v_e$ 为 15m/s。按式（2-6）计算第 2 段管道内径

$$D_e=0.1457\times(62.9/15)^{1/2}=0.29\ (m)$$

因此，在进入计算软件对系统参数进行验算时，可将两段管径分别输入为 250mm 和 300mm。

（8）软件计算。

1）输入数据。初速：12m/s；当地气温：20℃；当地大气压：$1.0kgf/cm^2$；管道段数：2。

各段数据见表 2-4。

表 2-4　　管道输入数据表

| 参　　数 | 第 1 段 | 第 2 段 |
|---|---|---|
| 垂直升高（m） | 3 | 25 |
| 水平长度（m） | 250 | 250 |
| 管道内径（mm） | 250 | 300 |
| 标准弯头数（个） | 4 | 5 |
| 假设压降（$kgf/cm^2$） | 0.5 | 0.4 |

注　$1kgf/cm^2=9.80665\times10^4Pa$。

2）计算结果。软件计算结果见表 2-5。

表 2-5　　软件计算结果表

| 管段 | 参　　数 | 软件计算结果 |
|---|---|---|
| 1 段 | 出力（t/h） | 43.78 |
| | 初速（m/s） | 12 |
| | 末速（m/s） | 15.8 |
| | 调整后压降（$kgf/cm^2$） | 0.53 |
| 2 段 | 出力（t/h） | 43.79 |
| | 初速（m/s） | 10.97 |
| | 末速（m/s） | 14.23 |
| | 调整后压降（$kgf/cm^2$） | 0.37 |
| | 风机入口风量（$m^3/min$） | 60.34 |
| | 标准状态风量（$m^3/min$） | 58.61 |
| | 灰气比 | 10.37 |

根据软件计算结果，两段输送管道设计出力、流速等均满足系统要求，并得出了输送风机的设计风量。

（9）系统阻力计算。按式（2-11）计算，系统总的压力损失（压降）如下

$$\Delta p=\Sigma\Delta p_L+\Delta p_P+\Delta p_0+\Delta p_f=(0.53+0.37)\times100000+3000+4000+1500=98500\ (Pa)$$

（10）确定输送风机的选型参数。根据以上计算结果，输送风机的入口计算风量为 $60.34m^3/min$，系统总压损为 98500Pa，分别考虑 1.1 和 1.2 的富裕系数，可得出风机的选型参数。风机的选型规定详见本书第五章。

（11）气锁阀容积计算。该工程每炉设四电场电除尘器，每电场 8 个灰斗，每个灰斗下设一个气锁阀。每电场的 8 个气锁阀分为 2 组，每组 4 个作为一个输送单元同时输送，底阀开启时间设定为 25s。

按式（2-8），气锁阀容积为

$$V=43.5\times(25+0.4\times25\times3)/(3600\times0.7\times0.75\times0.9\times4)=0.35\ (m^3)$$

根据表 2-3，将气锁阀容积确定为 $0.4m^3$。

## 二、仓泵气力输送系统

正压仓泵气力输送系统是指以仓泵作为输送设备、以压缩空气作为输送介质和动力进行物料输送的系统，压缩空气一般由空气压缩机提供。该系统可分为仓泵稀相和仓泵浓相气力输送系统。

### （一）仓泵稀相气力输送系统

仓泵稀相气力输送系统也称为低浓度仓泵输送系

统，是指采用稀相悬浮流输送的仓泵系统，可用于电厂粉煤灰、渣、石灰石粉、石子煤等物料的输送。该系统的类型比较多，常用的有单仓泵系统、双仓泵系统和多仓泵串联输送系统。

1. 设计要求

系统及布置设计要求如下：

（1）仓泵稀相气力输送系统用于输灰时，宜每炉设 1 套系统，系统设计出力应不小于锅炉最大连续蒸发量工况、燃用设计煤种时排灰量的 150%，同时应不小于燃用校核煤种时排灰量的 120%。

（2）仓泵稀相气力输送系统用于输渣时，宜每炉设 2 套系统，1 套运行，1 套备用；每套系统的出力要求与输灰系统相同。

（3）仓泵稀相气力输送系统设计和计算时，一般输送料气比按 5～25kg/kg 考虑。

（4）气力输送管道始端最低初速宜取 10～12m/s，末速一般不宜超过 25m/s。

（5）仓泵稀相气力输送系统可采用单仓泵单管或双仓泵单管的配置方式，一级输送距离不宜超过 1500m，单根管道的设计出力不宜超过 80t/h。

（6）仓泵设备的出料方式可采用上引式，也可采用下引式。

（7）仓泵出口的气力输送管道应设有自动防堵措施和自动消堵措施。

（8）当系统用于除尘器飞灰输送时，灰斗排灰宜采用埋刮板输送机或空气斜槽等设备，将灰集中至仓泵输送。单仓泵进口一般需设置缓冲灰斗（中间仓），其容积不小于进料设备 5min 的进料量；双仓泵进口设置可双向给料的饲料机。

（9）仓泵一般采用地上布置，其底部与地面的净空距离满足底阀等的检修要求。在仓泵进料阀处一般设检修维护平台。

（10）仓泵进料过程的排气管道一般就近接至灰斗或料仓的高料位以上；排气管上设气动排气阀，排气管与水平面的夹角不小于 55°。

（11）输送管道的排堵管道出口接至灰斗或料仓高料位以上，排堵管道出口段采用倾斜布置，避免积灰，当管道较长时，还应考虑管道内的放灰和吹扫点。

（12）气力输送管道的设计要求与稀相气锁阀系统相同。

2. 设计计算

以气力输送系统为例，说明仓泵稀相气力输送系统的设计计算。

（1）计算原始资料。原始资料与气锁阀系统相同。

（2）系统基本数据计算。

1）系统出力 $G$。系统出力的计算方法与气锁阀系统相同，见式（2-1）。计算得出系统设计出力后，再根据出力要求和实际输送距离，初选某一规格的仓泵，然后核算仓泵稀相气力输送系统的出力是否满足要求。

a. 单仓泵系统的出力 $G$（t/h）计算见式（2-12）

$$G=\frac{60\psi\rho_h V_p}{t_1+t_2} \tag{2-12}$$

b. 双仓泵系统的出力计算见式（2-13）

$$G=\frac{60\psi\rho_h V_p}{t_2+t_3} \tag{2-13}$$

$$t_3=\phi\frac{V_b}{q_V}\left(\frac{p_k-p_c}{p_a}\cdot\frac{273+t_a}{273+t}\right) \tag{2-14}$$

$$p_c=p_a+100L_{eq} \tag{2-15}$$

式中 $\psi$ ——仓泵充满系数，一般取 0.8；

$\rho_h$ ——灰的堆积密度，t/m³；

$V_p$ ——仓泵的容积，m³；

$t_1$ ——装满一仓灰所需的时间，min，与上游给料设备的出力有关；

$t_2$ ——吹送一仓灰所需的时间，min，与物料特性、仓泵容积和输送管道的长度等有关，根据运行电厂的实测数据，2.5m³ 仓泵的送灰时间见表 2-6，供设计时参考选用，4m³ 以上仓泵的 $t_2$ 可在表 2-6 中数据的基础上，增加 1～2min 选用；

$t_3$ ——仓泵的压力回升时间，min；

$\phi$ ——供气系统漏风系数，一般取 1.1～1.2；

$V_b$ ——供气系统储气总容积，m³；

$q_V$ ——仓泵输送所需的自由空气流量，m³/min；

$p_k$ ——仓泵的开泵绝对压力，Pa；

$p_c$ ——仓泵的关泵绝对压力，Pa；

$p_a$ ——当地大气压力，Pa；

$t_a$ ——当地大气平均温度，℃；

$t$ ——压缩空气的供气温度，℃。

**表 2-6 2.5m³ 仓泵的吹灰时间 $t_2$ 数值**

| 当量长度（m） | <200 | 200～400 | 400～800 | 800～1200 | 1200～1600 |
|---|---|---|---|---|---|
| 每仓吹灰时间 $t_2$（min） | 1.5～2.0 | 2.0～3.0 | 3.0～5.0 | 5.0～7 | 7～9 |

2）管道当量长度 $L_{eq}$。当仓泵稀相气力输送系统中输送管道上装有各种管道附件时，为简化计算，可将各种管道附件折合成当量长度，则管道的总当量长度 $L_{eq}$ 按式（2-16）计算

$$L_{eq}=L\pm H+\sum nL_r \tag{2-16}$$

式中 $L$ ——水平输送管道总长度，m；

$H$ ——垂直输送管道总长度，m，其中“+”用

于上升，"−"号用于下降；

$n$——各类管道附件数量，个；

$L_r$——各类管道附件的当量长度，m，可参照表2-7选用，大小头的当量长度与其出入口管径的比值 $D_b/D_a$ 有关，参照表2-8选用。

表 2-7　　各类管道附件（弯管、阀门）的当量长度

| 附件 / 输送物料 | 弯管（m） | | | | | 阀门（m） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 90° | 60° | 45° | 30° | 15° | |
| 灰 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2.5 | 10～20 |
| 渣 | 15 | 12 | 9 | 6 | 4 | 15～30 |

注　对于一般闸阀取表中小值，球阀取表中大值。

表 2-8　　大 小 头 的 当 量 长 度

| $D_b/D_a$ | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 当量长度（m） | 3 | 6 | 9 | 12 | 14 | 16 | 19 | 20 | 22 | 23 |

3）输送灰气比$\mu$。系统输送灰气比$\mu$与输送距离、灰的特性和仓泵容积等有关。一般输送距离越长，则灰气比越小。对于仓泵稀相气力除灰：$\mu$=5～25kg/kg。

根据国内各运行电厂的实测数据，2.5m³ 仓泵系统的平均输送灰气混合比与输送当量距离的关系见表2-9，供设计计算时参考选用。4m³ 以上仓泵的灰气比可在表2-9中数据的基础上，增加1～2kg/kg选用。

表 2-9　　2.5m³ 仓泵平均灰气比与输送当量距离的对应关系

| 当量长度（m） | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mu$ | 25 | 22 | 17 | 15 | 12 | 10 | 9 | 7 | 6 | 5 | 5 |

4）输送系统所需的空气量。仓泵正压系统所需的空气质量流量 $q_m$、标准状态下的空气体积流量 $q_0$ 和管道任意点的体积流量可分别按本章的式（2-2）、式（2-3）和式（2-4）进行初算。

单、双仓泵系统均为间断运行，故系统所需的自由空气体积流量应根据仓泵每一工作周期所需的气量，再折合成每分钟的平均耗气量，即按式（2-17）进行核算

$$q_{V_a}=\phi\frac{m_h\times10^3}{\mu\rho_a(t_2+t_3)} \tag{2-17}$$

式中　$q_{V_a}$——仓泵系统的平均空气体积流量，m³/min；

$\rho_a$——当地自由空气密度，kg/m³；

$m_h$——仓泵装灰量，t/仓。

输送管道中任意计算点的空气体积流量 $q_V$ 按式（2-18）进行计算，空气密度$\rho$按式（2-19）进行计算

$$q_V=\frac{p_aT}{pT_a}q_{V_a} \tag{2-18}$$

$$\rho=0.003415\frac{p}{T} \tag{2-19}$$

式中　$q_V$——计算点的空气体积流量，m³/min；

$\rho$——计算点的空气密度，kg/m³；

$p$——计算点的绝对压力，Pa；

$T$——计算点的热力学温度（绝对温度），K；

$p_a$——当地大气压力，Pa；

$T_a$——当地大气平均温度，K；

$q_{V_a}$——输送管道的自由空气流量，m³/min。

5）气灰混合物温度。关于气灰混合物温度，仓泵稀相气力输送系统有两种考虑方法：

a. 传统的估算方法。先计算灰管起点的气灰混合物温度，然后按管道温降的经验数据估算管道沿程各计算点的温度。

输送管道起点温度的计算见式（2-20）

$$t_m=\frac{G_mc_ht_h+G_{ma}c_at_a}{G_mc_h+G_{ma}c_a} \tag{2-20}$$

式中　$t_m$——输送管道起始端气灰混合物温度，℃；

$G_m$——输送设备出力，kg/h；

$G_{ma}$——输送用空气质量流量，kg/h；

$c_h$——干灰比热容，kJ/（kg·℃），见表2-10；

$c_a$——空气比热容，kJ/(kg·℃)，一般取1.0032kJ/（kg·℃），或0.24kcal/（kg·℃）；

$t_h$——锅炉排烟温度（灰温），℃；

$t_a$——输送压缩空气温度，℃。

表 2-10　　干灰比热容 $c_h$ 值

| 温度（℃） | <100 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 比热容 $c_h$ [kJ/（kg·℃）] | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.207 | 0.213 | 0.22 | 0.225 | 0.227 | 0.23 |

在输灰过程中，由于管道对外界的散热，其温度会逐渐降低，但管道各点的温度难以精确计算。根据各电厂仓泵稀相气力输送系统运行中实测统计的管道温降与环境温度的关系参见表 2-11。在实际估算时，可将灰管长度等分成若干 100m，在已知起点温度的情况下，按表 2-11 中的温降数据依次估算出每 100m 两端的温度，然后按比例可估算出每 100m 内任意点的温度。

表 2-11　　正压稀相输灰管道温降与环境温度关系　　（℃）

| 与环境温度差 | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 灰管每 100m 的温降 | 21 | 19 | 17 | 15 | 12 | 9 | 6 | 4 | 2 | 1 |

b. 简化方法。参照气锁阀和负压稀相系统比较先进的计算方法，将气力输送近似地考虑为定温绝热过程。

6）输送速度。仓泵稀相气力输送系统属于悬浮流输送，根据国内外有关试验研究成果和工程经验，其输送管道起始端的输送初速推荐采用 10～12m/s，管道输送末速宜控制在 25m/s 以内。如果输送管道较长，为降低流速，需将管道分为几段，管径逐段放大。计算管段的任意点流速 $v_a$ 可按式（2-5）计算。

7）输送管道管径。输送管道的内径计算见式（2-6）。

8）空气的摩擦阻力系数。对于稀相气力输送系统，输送流态一般处于紊流状态，且在阻力平方区，因此，摩擦阻力系数 $\lambda_a$ 只与管道的相对粗糙度有关，可按式（2-21）计算

$$\lambda_a = \frac{1}{\left(1.14 + 2\lg\frac{D}{\varepsilon}\right)^2} \tag{2-21}$$

式中 $D$——管道内径，m；

$\varepsilon$——管道内壁的平均绝对粗糙度，m。

对于无缝钢管，$\varepsilon$=0.0002m；对于焊接钢管，$\varepsilon$=0.0003m；对于铸铁合金管，$\varepsilon$=0.0005m。

（3）压力损失计算。仓泵稀相气力输送系统的压力损失是从输送管道的末端（即入库点）向管道起始端逐段进行计算的，由以下各部分组成：

1）管道压力损失$\Delta p_L$。输送管道的压力损失应为水平、垂直管道及各种管道附件压力损失的总和。为简化计算，一般可将各个部分折合成当量长度的水平管道，其计算公式为

$$\Delta p_L = \left(\sqrt{p_e^2 + 19.6 p_e \lambda_a \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{\rho_e v_e^2}{2g}} - p_e\right)(1 + k\mu) \tag{2-22}$$

式中 $\Delta p_L$——正压输送管道的压力损失，Pa；

$p_e$——计算管段末端绝对压力，Pa，对于最后一段管道，$p_e$ 即为入库接口处的压力；

$\lambda_a$——计算管段的空气摩擦阻力系数；

$L_{eq}$——计算管段的当量长度，m；

$D$——计算管段的管道内径，m；

$\rho_e$——计算管段末端的空气密度，kg/m³；

$v_e$——计算管段末端流速，m/s；

$g$——重力加速度，取 9.81m/s²；

$\mu$——输送灰气比，kg/kg；

$k$——两相流系数，一般可通过试验求得，也可按表 2-12 所列数据选用。

表 2-12　　两相流系数

| 管径（mm） | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | >200 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 两相流系数 $k$ | 0.30 | 0.35～0.45 | 0.45～0.55 | 0.65～0.75 | 0.85～0.95 | 1.00 及以上 |

2）加料设备的压力损失$\Delta p_P$。加料设备的压力损失与仓泵的容积、结构和排料原理等有关，上引式仓泵内压力损失的经验数据见表 2-13，下引式仓泵由于同时靠物料重力和空气动压排料，压力损失相对较小，可按表 2-13 中数据的下限选用。

表 2-13　　上引式仓泵内压力损失

| 仓泵空气流量（m³/min） | 压力损失$\Delta p_P$（Pa） |
|---|---|
| 20～40 | 60000～120000 |
| >40 | 120000～150000 |

3）入库压力损失$\Delta p_0$。入库压力损失可按式（2-10）计算。据工程实测，$\Delta p_0$ 一般为 3000～5000Pa。

4）布袋除尘器的压力损失$\Delta p_f$。一般根据制造厂家提供的有关压力损失数据选用，没有厂家数据时，可按1000～1500Pa考虑。

5）系统压力损失汇总计算公式与气锁阀系统相同，见式（2-11）。

3. 设备选型

系统主要设备包括仓泵和输送空气压缩机，而仓泵主要有上引式和下引式仓泵两大类型。

（1）上引式仓泵。

1）结构。上引式仓泵结构见图2-4。

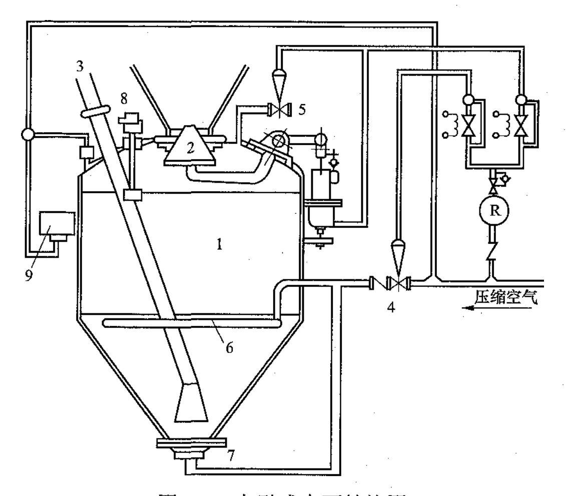



图2-4 上引式仓泵结构图

1—仓泵罐体；2—进料阀；3—出料管；4—进气阀组件；5—排气阀；6—环形吹松管；7—底部进气阀；8—料位计；9—压力传感器

上引式仓泵的主要结构特点是出料管从罐体的顶部引出，它由罐体、排气阀、进料阀、进风阀、底部进风阀、料位计及出料管等部件组成。罐体是一个带拱形封头、锥形筒底的圆筒形压力容器。罐体的顶部装有气动锥形进料阀。底部进风阀是安装在罐体的底部，由于其阀盘的受力面积大，开关行程小，易于启闭。当压缩空气进入阀座的气室时，阀盘即被顶开，阀杆的下端连接有弹簧座，可对阀门的启闭起缓冲作用。压缩空气切断后，阀盘靠其自重及弹簧的张力作用，与气室的上阀座保持紧密的接合。

工程中常用的国产上引式仓泵有CB型、CD型仓泵。其中CB型仓泵的底部采用弹簧式底阀结构；CD型为新型流态化上引式仓泵，在仓泵的底部采用气化装置，取代了弹簧式底阀，输送时压缩空气通过气化板进入罐内，使物料充分流化、排出时浓度均匀，有利于粉料的输送。气化板材料可采用SiC，也可采用多层纤维织物。

2）主要技术数据。CB型和CD型仓泵的主要技术参数分别见表2-14和表2-15。

表2-14 CB型上引式仓泵主要技术参数

| 参数 | 型号 | | |
|---|---|---|---|
| | CB2.5A | CB4.0A | CB8.0A |
| 设计出力（t/h） | 12～20 | 20～35 | 35～60 |
| 设计压力（MPa） | 1.0 | | |
| 几何容积（m³） | 2.5 | 4.0 | 8.0 |
| 泵体内径 *D*（mm） | 1600 | 1800 | 2200 |
| 输送距离（m） | <1500 | | |
| 控制气源压力（MPa） | 0.4～0.6 | | |

表2-15 CD型上引式仓泵主要技术参数

| 参数 | 型号 | | |
|---|---|---|---|
| | CD2.5A | CD4.0A | CD8.0A |
| 设计出力（t/h） | 12～20 | 20～35 | 35～60 |
| 设计压力（MPa） | 1.0 | | |
| 几何容积（m³） | 2.5 | 4.0 | 8.0 |
| 泵体内径 *D*（mm） | 1600 | 1800 | 2200 |
| 输送距离（m） | <1500 | | |
| 控制气源压力（MPa） | 0.4～0.6 | | |

（2）下引式仓泵。

1）结构。下引式仓泵结构见图2-5。

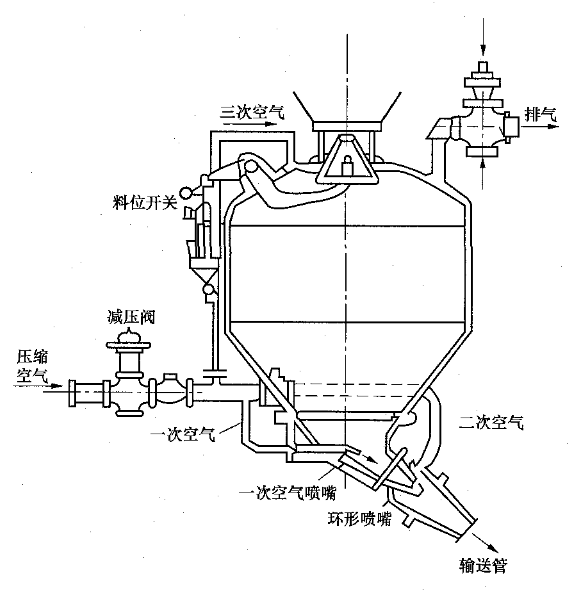



图2-5 下引式仓泵结构图

下引式仓泵的主要结构特点是物料从罐体的底部排出，喂入输送管道，它由罐体、排气阀、进料阀、料位开关、排料喷嘴和供气管等部件组成。供气管分为三路进入仓泵，供气母管上装有减压阀。

工程中常用的国产下引式仓泵有 CP 型、L 型、QPB 型、NCP 型等。其中 L 型为流态化下引式仓泵，流态化仓泵在仓泵罐体的锥底装有多孔气化板，输送时使物料充分流化、排出时浓度均匀，有利于粉料的输送，防止出料口堵塞。

2）主要技术数据。以常用 CP 型和 NCP 型仓泵为例，其主要技术参数分别见表 2-16 和表 2-17。

**表 2-16　CP 型下引式仓泵主要技术参数**

| 参　数 | 型　号 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | CP2.0 | CP3.0 | CP4.5 | CP6.0 |
| 仓泵容积（$m^3$） | 2.0 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 罐体内径（mm） | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| 出料管径（mm） | 80 | 125 | 150 | 175 |
| 工作压力（MPa） | 0.5～0.7 | | | |

**表 2-17　NCP 型下引式仓泵主要技术参数**

| 参　数 | 型　号 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NCP2.0 | NCP3.0 | NCP4.0 | NCP5.0 | NCP8.0 |
| 仓泵容积（$m^3$） | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 8.0 |
| 输送能力（t/h） | 26 | 30 | 35 | 47 | 62 |
| 输送距离（m） | 约 1000 | | | | |
| 工作压力（MPa） | 0.3～0.6 | | | | |

4. 系统图

典型的仓泵稀相气力输送系统图参见图 2-6 和图 2-7。

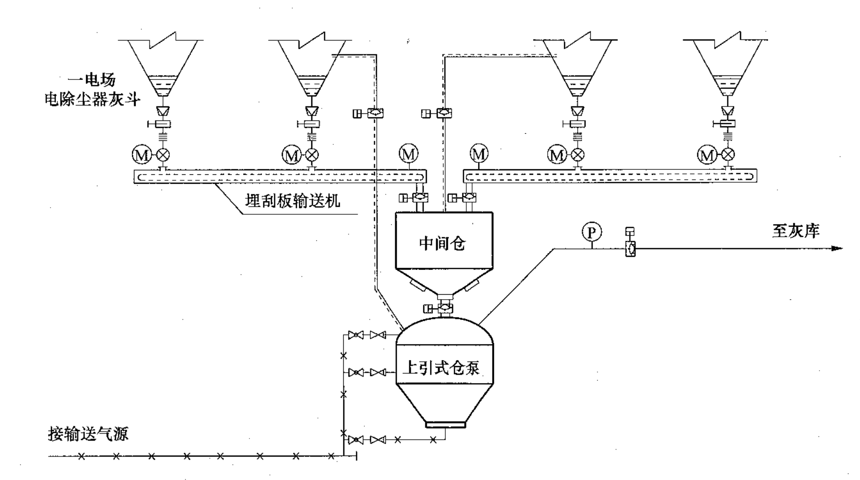



图 2-6　除尘器下单仓泵输送系统图

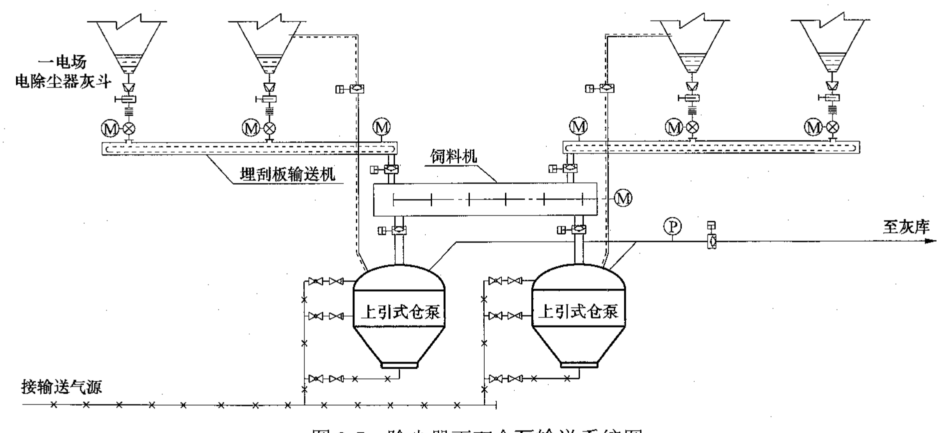



图 2-7　除尘器下双仓泵输送系统图

5. 计算举例

以下举例说明仓泵稀相气力输送系统的计算，供工程设计时参考。

某 300MW 工程锅炉电除尘器一电场飞灰由空气斜槽集中后，采用一套正压双仓泵系统、一根灰管输送至粗灰库。设计原始资料和系统计算如下：

（1）计算原始资料（一台炉）。

1）输送物料：普通煤粉炉电除尘器一电场飞灰，

堆积密度为 $0.75t/m^3$。

2）设计灰量：$G_h$=20t/h。

3）灰管输送距离：水平总长度 $L$=520m，垂直升高 $H$=30m，90°弯头 $N$=8。

4）当地气象条件：平均气温 $t_a$ 为 20℃（293K）；大气压 $p_a$ 为 90000Pa。

5）当地自由空气密度：$\rho_a$ 为 $1.048kg/m^3$。

（2）系统基本数据。

1）系统设计出力 $G$。系统出力按式（2-1）计算

$$G=150\%\times20=30\ (t/h)$$

2）输送管道当量长度 $L_{eq}$。管道当量长度按式（2-16）计算

$$L_{eq}=520+30+8\times10=630\ (m)$$

3）输送灰气比$\mu$。根据表 2-9 及说明，选取灰气比$\mu$=14kg/kg。

4）初选仓泵规格 $V_p$。根据系统出力和输送当量距离，初选 $4.5m^3$ 双仓泵。

5）初选输送空气量 $q_V$。输送空气量按式（2-2）计算

$$q_m=16.67\times30/14=35.7\ (kg/min)$$

$$q_V=q_m/\rho_a=34\ (m^3/min)$$

6）有关压缩空气供气系统的几项数据。

a. 仓泵供气系统储气容积 $V_b$。供气管路设 $6m^3$ 储气罐，并考虑一定的供气管道容积，$V_b$ 按 $6.5m^3$ 估算。

b. 空气温度 $t$。空气压缩机设有后冷却器，供气温度 $t$=35℃。

c. 开泵压力 $p_k$。一般除灰空气压缩机实际供气绝对压力约为 700kPa，考虑一定的供气系统压力损失和富裕系数，初选开泵绝对压力 $p_k$=600kPa=600000Pa。

d. 关泵压力 $p_c$。关泵压力按式（2-15）估算

$$p_c=90000+100\times630=153000\ (Pa)$$

7）仓泵每仓输送时间 $t_2$。查表 2-6 及说明，$t_2$=4min。

8）仓泵的压力回升时间 $t_3$。按式（2-14）计算

$$t_3=1.1\times\frac{6.5}{34}\times\left(\frac{600000-153000}{90000}\times\frac{293}{273+35}\right)$$

$$=1.0\ (min)$$

9）核算双仓泵系统的出力 $G$。按式（2-13）计算

$$G=\frac{60\times0.8\times0.75\times4.5}{4+1.0}=32.4\ (t/h)$$

满足第 1）项的系统设计出力要求。

10）每仓装灰量 $m_h$

$$m_h=\Psi\rho_h V_p=0.8\times0.75\times4.5=2.7\ (t)$$

11）核算仓泵系统实际耗气量 $q_{V_s}$。按式（2-17）计算

$$q_{V_s}=1.1\times\frac{2.7\times10^3}{14\times1.048\times(4+1.0)}=40\ (m^3/min)$$

12）关于输送管道混合物温度 $t_m$。根据简化计算方法，输送管道内混合物温度按供气温度考虑，$t_m$=35℃。

（3）输送管道分段及压力损失计算。在仓泵气力输送系统管道计算中，如输送距离较长，管道需变径分段为 2 段以上，其目的是保证管道内每点的流速均在最低流速和最高控制流速之间（一般为 10～25m/s）；同时，尽量控制管道系统的总压力损失。根据经验，一般当输送当量长度为 600m 左右时，管道需变径分段为 2 段计算；当输送当量长度为 1000m 左右时，管道需变径分段为 3 段计算。计算时，应先以管道终点，即入库点为原点开始，由后向前，分段进行试算，直至计算合格为止。

该例的输送当量长度 $L_{eq}$ 为 630m，输送管道暂按 2 段考虑；从入库点开始，由后向前，分为Ⅰ段（后段）和Ⅱ段（前段）分别进行管段计算。

1）Ⅰ段（后段）管道计算：

Ⅰ段末端绝对压力

$$p_{e1}=p_a+\Delta p_0+\Delta p_f=90000+5000+1500=96500\ (Pa)$$

Ⅰ段末端绝对温度：为简化计算，管内温度按供气温度考虑

$$T_{e1}=273+35=308\ (K)$$

按式（2-18）计算末端（入库点）空气流量

$$q_{V_e}=40\times308\times90000/(293\times96500)$$

$$=39.2\ (m^3/min)$$

假定入库点空气流速 $v_{e1}$ 为 25m/s。按式（2-6）计算管道内径

$$D_1=0.1457\times(39.2/25)^{1/2}=0.182\ (m)$$

因此，输送管道选用$\phi194\times7$ 的无缝钢管；内径 $D_1$=0.18m。

核算Ⅰ段管道末速 $v_{e1}$：按式（2-5）计算

$$v_{e1}=0.0212\times\frac{39.2}{0.18^2}=25.6\ (m/s)$$

暂定Ⅰ段管道当量长度：按经验，后段比前段管道略短，暂定 $L_{eq1}$=250m。

计算Ⅰ段管道的压力损失：

a. 计算管段的空气摩擦阻力系数$\lambda_{a1}$。按式（2-21）计算

$$\lambda_{a1}=\frac{1}{\left(1.14+2\lg\frac{0.18}{0.0002}\right)^2}=0.02$$

b. 计算管段末端的空气密度$\rho_{e1}$。按式（2-19）计算

$$\rho_{e1}=0.003415\times96500/308=1.07\ (kg/m^3)$$

c. 两相流系数 $k$。按表 2-12，取 $k$=0.7。

d. Ⅰ段管道的压力损失$\Delta p_{L1}$。按式（2-22）计算

$$\Delta p_{L1}=\left(\sqrt{p_{e1}^2+19.6p_{e1}\lambda_{a1}\frac{L_{eq1}}{D_1}\times\frac{\rho_{e1}v_{e1}^2}{2g}}-p_{e1}\right)(1+k\mu)$$

$=100356$（Pa）

Ⅰ段管道始端的绝对压力$p_{b1}$

$p_{b1}=p_{e1}+\Delta p_{L1}=96500+100356=196856$（Pa）

Ⅰ段管道始端的体积流量$q_{V_{b1}}$。按式（2-18）计算

$q_{V_{b1}}=40\times(90000\times308)/(196856\times293)$

$=19.22$（$m^3/min$）

Ⅰ段管道始端的流速$v_{b1}$。按式（2-5）计算

$$v_{b1}=0.0212\times\frac{19.22}{0.18^2}=12.6\ (m/s)$$

Ⅰ段管道的初速大于10m/s，满足要求。

Ⅰ段管道始端的空气密度$\rho_{b1}$。按式（2-19）计算

$\rho_{b1}=0.003415\times196856/308=2.183$（$kg/m^3$）

2）Ⅱ段（前段）管道计算。

Ⅱ段管道当量长度

$L_{eq2}=630-250=380$（m）

Ⅱ段管道内径：按经验，前段比后段管道小15～30mm，故选取$\phi168\times7$无缝钢管，$D_2=0.154$m。

Ⅱ段管道末端绝对压力

$p_{e2}=p_{b1}=196856$Pa

Ⅱ段管道末端温度

$T_{e2}=T_{b1}=308$K

Ⅱ段管道末端密度

$\rho_{e2}=\rho_{b1}=2.183kg/m^3$

Ⅱ段管道末端空气流量

$q_{V_{e2}}=q_{V_{b1}}=19.22\ m^3/min$

Ⅱ段管道末端的流速$v_{e2}$。按式（2-5）计算

$$v_{e2}=0.0212\times\frac{19.22}{0.154^2}=17.2\ (m/s)$$

计算Ⅱ段管道的压力损失：

a. 计算管段的空气摩擦阻力系数$\lambda_{a2}$。按式（2-21）计算

$$\lambda_{a2}=\frac{1}{\left(1.14+2\lg\frac{0.154}{0.0002}\right)^2}=0.021$$

b. 两相流系数$k$。按表2-10，取$k=0.5$。

c. Ⅱ段管道的压力损失$\Delta p_{L2}$。按式（2-22）计算

$$\Delta p_{L2}=\left(\sqrt{p_{e2}^2+19.6p_{e2}\lambda_{a2}\frac{L_{eq2}}{D_2}\times\frac{\rho_{e2}v_{e2}^2}{2g}}-p_{e2}\right)(1+k\mu)$$

$=128609$（Pa）

Ⅱ段管道始端的绝对压力$p_{b2}$

$p_{b2}=p_{e2}+\Delta p_{L2}=196856+128609=325465$（Pa）

Ⅱ段管道始端的体积流量$q_{V_{b2}}$。按式（2-18）计算

$q_{V_{b2}}=40(90000\times308)/(325465\times293)$

$=11.63$（$m^3/min$）

Ⅱ段管道始端的流速$v_{b2}$。按式（2-5）计算

$$v_{b2}=0.0212\times\frac{11.63}{0.154^2}=10.4\ (m/s)$$

Ⅱ段管道的初速大于10m/s，满足要求。

（4）双仓泵系统总的压力损失$\Delta p$。按式（2-11）计算

$$\Delta p=\Sigma\Delta p_L+\Delta p_P+\Delta p_0+\Delta p_f$$

按表2-13选取数据（仓泵空气流量约40$m^3/min$），$\Delta p_P=120000$Pa，则

$\Delta p=100356+128609+120000+5000+1500$

$=355465$（Pa）$=355.5$（kPa）

（5）核算仓泵系统的开泵压力$p_k$。从仓泵系统的总压损可以得出开泵压力约为355kPa（表压），即开泵绝对压力$p_k=455$kPa，小于初选的开泵压力600kPa，满足要求。

（6）计算结果，见表2-18。

**表2-18　计算结果**

| 项目 | | 计算结果 |
|---|---|---|
| 输灰管段：前段（Ⅱ段） | 管径（mm） | $\phi168\times7$ |
| | 初速（m/s） | 10.4 |
| | 末速（m/s） | 17.2 |
| | 管段压降（Pa） | 128609 |
| 输灰管段：后段（Ⅰ段） | 管径（mm） | $\phi194\times7$ |
| | 初速（m/s） | 12.6 |
| | 末速（m/s） | 25.6 |
| | 管段压降（Pa） | 100356 |
| 双仓泵系统 | 系统出力（t/h） | 32.4 |
| | 仓泵容积（$m^3$） | 4.5 |
| | 系统耗气量（$m^3/min$） | 40 |
| | 系统总压降（Pa） | 355465 |
| | 计算灰气比 | 14 |

（7）确定输送空气压缩机的选型参数。根据以上计算结果，系统的计算空气耗量为40$m^3/min$，可考虑1.1～1.2的富裕系数，得出空气压缩机的流量参数；空气压缩机的压力一般选择700～800kPa。空气压缩机的选型详见本书第五章。

### （二）仓泵浓相气力输送系统

仓泵浓相气力输送系统也称为高浓度仓泵输送系统，是指采用非悬浮流输送（包括稀相加流态化密相、

稀相加不稳定区及栓流输送）的仓泵系统，可用于电厂除尘器灰、省煤器灰等物料的输送，这类仓泵系统还可用于石灰石粉、床料、渣、石子煤等物料的输送（属稀相输送）。目前，输送粉煤灰、石灰石粉等的浓相气力输送系统已成为电厂除灰的主流系统。

1. 设计要求

系统及布置设计的要求如下：

（1）对电厂锅炉除尘器下的浓相气力输送系统，其设计出力应不小于锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤种时排灰量的150%，且不小于燃用校核煤种时排灰量的120%。

锅炉烟道灰斗（包括省煤器灰斗、脱硝灰斗、空气预热器灰斗及烟道灰斗等）的气力输送系统设计出力以锅炉厂提供的灰量数据为基数，设计裕度不小于除尘器输灰系统。

（2）浓相气力输送系统设计和计算时，按输送距离的不同，输送灰气比按20～80kg/kg选取，其他物料的料气比应通过输送试验或类似工程的经验数据确定。

（3）浓相气力输送系统的输送速度与物料特性有关，一般输送初速为3～10m/s，末速一般要求控制在25m/s以内。

（4）浓相仓泵输送设备宜成组运行，仓泵出料方式宜为下引式。布袋除尘器、电除尘器一电场每组内同时运行的输送泵设备数量宜控制在2～6台以内。

（5）输送管道根数宜根据系统出力、输送设备组数、运行安排和管道使用率等合理选择。每组同时运行的输送泵设备所配灰管的输送出力宜控制在80t/h以内，灰管输送距离一般不超过2000m。电除尘器一电场输灰管道宜单独设置，独立运行。

（6）输送管道应设有自动防堵和排堵措施；灰道吹堵要求一根一根间隔进行，不允许同时吹堵。

（7）正常运行的输送系统，电除尘器二电场及以后各电场（包括锅炉烟道灰斗）的各组仓泵的运行应统一安排、顺序运行，避免每台炉所有输灰管道同时运行。

（8）电除尘器一、二电场的仓泵应每台泵设一个料位计，并可根据料位或时间信号连续运行；省煤器等烟道、电除尘器三电场及以后各电场的容积小于$0.5m^3$的仓泵，可少量设置或不设料位计，宜根据时间信号定期运行，以减少每班运行次数。

（9）容积$0.5m^3$及以上的仓泵宜单独设排气（平衡）管道，电除尘器三电场及以后各电场容积小于$0.5m^3$的输送泵可根据运行情况酌情设置排气（平衡）管道。排气宜排至灰斗或灰库高料位以上；排气管上应设联动阀门。

（10）电除尘器二电场及后续各电场的输送系统出力应满足一电场故障时灰量后移的工况。

（11）浓相气力输送系统应设专用的气源系统。

（12）浓相气力输送系统用于除尘器飞灰输送时，每个灰斗下装设一套仓泵（输灰器）。为方便检修，仓泵与灰斗之间装设一个手动隔离阀。

（13）仓泵一般采用地上布置，其底部与地面的净空距离满足底阀等的检修要求。在仓泵进料阀处一般设检修维护平台。

（14）仓泵排气管的布置应有一定斜度，避免水平布置或小角度布置；排气管道的出口宜与烟气流向一致。

（15）输送管道的排堵管道应接至灰斗或料仓高料位以上，排堵管道出口段采用倾斜布置。

（16）气力输送管道的设计要求：

1）输送管道的设计要求与稀相气锁阀系统相同。

2）气力输渣管的直管段、弯头及管道附件等均应采用耐磨材料。

3）对于输送石灰石粉等流速较高、磨损严重的直管段，经技术经济比较后可采用耐磨管道。

2. 设计计算

（1）耗气量估算。浓相气力输送系统的耗气量在工程前期设计中一般根据物料气力输送的料气比进行估算。料气比是气力输送系统的一个重要参数，与物料特性、输送方式、输送距离及输送速度等因素有关，尤其是物料特性和输送距离对料气比的影响较大。准确的料气比应通过物料输送试验取得。

对于浓相气力输送系统的耗气量，可根据灰样的输送试验取得灰气比$\mu$，或根据类似工程的经验数据选取灰气比$\mu$后，按式（2-23）进行估算。

1）标准状态下的耗气量$q_0$。按式（2-3）进行计算。

2）当地自由状态下（空气压缩机进气状态）的耗气量$q_{V_a}$（考虑10%富裕系数）

$$q_{V_a}=1.1\times\frac{12.89Gp_0\times(273+t_a)}{\mu p_a\times273} \quad (2\text{-}23)$$

式中 $q_{V_a}$——耗气量，$m^3/min$；

$G$——系统出力，t/h，按式（2-1）计算；

$p_0$——标准状态下的大气压，101.325kPa；

$t_a$——当地平均气温，℃；

$p_a$——当地平均气压，kPa；

$\mu$——输送灰气比，kg/kg，可按式（2-24）估算。

3）浓相气力输送系统输送灰气比$\mu$。根据有关资料和工程的经验数据，在工程前期设计中，浓相气力输送系统输送灰气比可按式（2-24）进行估算

$$\mu=\frac{K_q}{\sqrt{L_{eq}}} \tag{2-24}$$

式中 $\mu$——输送灰气比，kg/kg；

$K_q$——飞灰特性值，对除尘器飞灰，可取500～600，对省煤器灰，可取300～400；

$L_{eq}$——输灰管道的当量长度，m。

4）几种特殊物料的料气比选取范围。浓相气力输送系统除输送粉煤灰以外，还可输送石灰石粉、石子煤、锅炉底渣等难以输送的物料，此时需改变系统的设计参数，选用合适的输送设备。根据电厂的运行经验，以上物料的实际输送距离均不宜超过500m；同时，根据输送试验的数据和国内各电厂实测的运行数据，其输送料气比$\mu$ 的选取参考范围见表2-19。工程计算时可根据实际的输送距离，选取合适的数值。

**表2-19 几种物料的料气比选取范围**

| 物料 | 底渣 | 石灰石粉 | 石子煤 |
|---|---|---|---|
| 料气比范围 | 5～15 | 5～15 | 5～10 |

（2）管道荷载和补偿计算。气力输送管道一般布置在管架上，并按规定的间距设置管道支架，形式一般有固定支架、导向支架和滑动支架。

当输送灰渣等热物料时，由于热胀冷缩，气力输送管道的设计和布置应考虑补偿措施。目前气力输送管线通常采用补偿器和自然补偿两种方式。当采用补偿器补偿时，在两个补偿器之间的直管段中点（或接近中点处）应设置1个固定支架，其余为导向支架或滑动支架，补偿器和弯头之间应设置1个固定支架，弯头附近的支架宜设置滑动支架；当采用自然补偿时，在每段直管段中点（或接近中点处）应设置固定支架，管道转弯处设置滑动支架。

气力输送管道宜尽量采用自然补偿法设计；多根管道（2根以上）的固定支架宜尽量分组错开设置。

管道支架承受的工作荷载包括管道垂直重力荷载和水平轴向推力；其结构设计荷载为工作荷载的1.4倍。

1）垂直荷载计算。输灰管道各个支架垂直荷载$F_z$的分配可按静力矩平衡法计算，也可按以下原则进行简化计算。

a. 当计算支架的前、后管段内无阀门等较重部件时，则两个支架间的管道垂直荷载$F_z$按平均分配计算。计算公式为

$$F_z=(1/2)G(L_1+L_2) \tag{2-25}$$

式中 $G$——灰管每米充满物料的单重，kN/m；

$L_1$、$L_2$——计算支架与前后相邻支架之间的管段（展开）长度，m。

如支架承受多根灰管，垂直荷载$F_z$应乘以管道根数。

b. 当支架之间的管道上装有补偿器时，则应按补偿器分段计算。

c. 当计算支架的前、后管段内有较重部件时，则应将部件重量按静力矩平衡法分配到其两侧支架。

2）水平轴向推力计算。导向、滑动支架与固定支架的水平轴向推力计算是不同的；而管线采用不同的补偿方式，固定支架的推力计算也是有区别的。支架推力可按以下规定和方法计算。

a. 导向和滑动支架的水平轴向推力$F_x$可按式（2-26）计算

$$F_x=fF_z\cos\alpha \tag{2-26}$$

式中 $f$——管壁与支座间的摩擦系数，钢与钢可取0.3；

$F_z$——支架的垂直荷载，kN；

$\alpha$——灰管轴线与水平面的夹角，(°)。

b. 采用补偿器的管线的固定支架水平轴向推力$F_x$，应考虑下列各项：

（a）固定支架两侧补偿器范围内的所有中间支架与管道产生的摩擦阻力$F_{x1}$。

对于直线段的固定支架

$$F_{x1}=fG(L_1-0.8L_2)\cos\alpha \tag{2-27}$$

式中 $L_1$——固定支架至补偿器距离较大一侧的管段长度，m；

$L_2$——固定支架至补偿器距离较小一侧的管段长度，m；

0.8——考虑两侧管段上温度及摩擦力的不均匀系数。

对于转弯处的固定支架

$$F_{x1}=fGL\cos\alpha \tag{2-28}$$

式中 $L$——固定支架至补偿器间的距离，m。

（b）填函式伸缩节（如果采用）产生的摩擦阻力$F_{x2}$。

对于转角固定支座或仅一侧装有伸缩节的直线段固定支座

$$F_{x2}=\pi Dbfp \tag{2-29}$$

式中 $b$——伸缩节填料长度，m；

$D$——灰管外径，m；

$p$——管道内的工作压力，kPa；

$f$——填料与管壁的摩擦系数，可取0.3。

对于两侧装有伸缩节的直线段固定支座

$$F_{x2}=0.2\pi Dbfp \tag{2-30}$$

注：在任何情况下，式（2-29）与式（2-30）中$bfp$不应小于7.5kN/m。

（c）波纹补偿器（如果采用）产生的水平轴向推

力 $F_{x3}$。如果采用波纹补偿器仅吸收轴向位移，波纹补偿器所产生的水平轴向推力由内压推力和弹性推力组成

$$F_{x3}=F_n+F_x \quad (2\text{-}31)$$

a）内压推力

$$F_n=pA \quad (2\text{-}32)$$

式中 $F_n$——波纹环面上的内压推力，N；

$p$——管道设计压力，MPa；

$A$——波纹环面上的有效面积，mm²。

注：在计算固定点推力时，还应根据管道布置情况（如是否装有阀门、弯头、堵头等），考虑介质压力作用在管道断面上的影响。

b）弹性推力

$$F_x=K_x x \quad (2\text{-}33)$$

式中 $K_x$——补偿器的轴向刚度，N/mm；

$x$——补偿器吸收的轴向位移量，mm。

注：1. 一般除灰管道的波纹补偿器只吸收轴向位移，如果需要吸收双向位移（横向和轴向），其推力包括内压推力、轴向弹性推力、横向弹性推力和弯矩，计算方法见 DL/T 5054《火力发电厂汽水管道设计技术规定》附录 D 中 D2.4。

2. 对于两侧装有波纹补偿器的直线段固定支座，固定支架应设于补偿器中间，则两个补偿器产生的力可以相互抵消。

（d）管道内压产生的水平轴向推力 $F_{x4}$，仅在管道转弯处的固定支架上产生

$$F_{x4}=1/4d^2p \quad (2\text{-}34)$$

式中 $d$——灰管内径，m；

$p$——灰管内的工作压力，kPa。

（e）灰管堵管产生的水平轴向推力 $F_{x5}$

$$F_{x5}=1/4d^2p_k \quad (2\text{-}35)$$

式中 $p_k$——灰管内的最高工作压力（开泵压力），kPa。

当敷设 3 条以上灰管时，支架上因温度变化引起的水平轴向推力应乘以牵制系数 $K$：3 条管道 $K=0.67$，4 条管道及以上 $K=0.5$。

以上灰管固定支架水平轴向推力的计算原则，设计时可根据每个支架的具体位置和管道数量等对水平轴向推力进行统计和汇总。

c. 采用自然补偿管线的固定支架水平轴向推力 $F_x$，仅有其两侧的支架与管道产生的摩擦阻力和堵管推力。

3）灰管自然补偿的判别计算。灰管采用自然补偿，可以省去补偿器，减少固定支架的设置数量，而且固定支架可以远离转弯处，其水平轴向推力较小。

判断管道能否自然补偿的方法有两个：①苏联方法；②美国方法。为保证自然补偿验算的可靠性，建议当两个方法的验算结果都满足自然补偿时，再确定计算管线按自然补偿设计。

a. 苏联方法，即 DL/T 5054《火力发电厂汽水管道设计技术规定》附录 D 中的判别方法。该方法认为，管道两端点间，无限位支吊点无分支的管道，其自然补偿能力是否满足要求，可按下式计算 $u$、$v$，利用图 2-8 进行初步判别

$$u=L/a-1 \quad (2\text{-}36)$$

$$v=nD/L \quad (2\text{-}37)$$

$$n=10^{-3}E\alpha(t-t_{er})/\sigma \quad (2\text{-}38)$$

式中 $L$——固定点间的管道展开长度，m；

$a$——固定点间的直线距离，m；

$D$——管道外径，m；

$n$——管道强度特性；

$\sigma$——设计温度下管材的许用应力，MPa；

$t$——设计温度，℃；

$t_{er}$——设计安装温度，℃；

$E$——设计温度下管材的金属弹性模量，kN/mm²；

$\alpha$——设计温度下管材的线膨胀系数，$10^{-6}$/℃。

当所求出的坐标（$u$，$v$）值在图 2-8 上查得的对应点落在 $A$ 区域内时，则管道可以满足自然补偿；当落在 $B$ 区域内时，必须精确计算后确定；当落在 $C$ 区域内，则不能满足自然补偿。

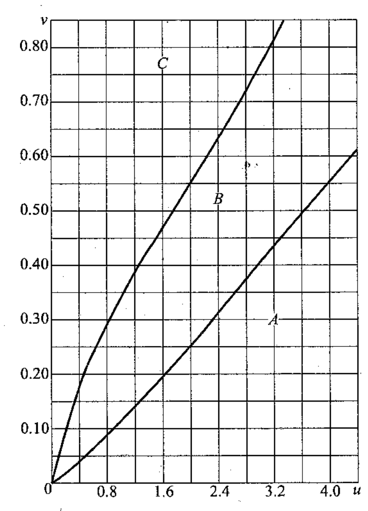



图 2-8 估算管道补偿能力曲线

b. 美国方法。美国方法认为，同一规格管子、两端固定、中间无限位支吊点、无分支的管道，能满足式（2-39），可初步判定其补偿能力满足要求

$$D_n\Delta/(L-a)^2\leqslant 20.8 \quad (2\text{-}39)$$

$$\Delta=\sqrt{dx,dx+dy,dy+dz,dz} \quad (2\text{-}40)$$

$$d_x=x(t-t_{er})\alpha \quad (2\text{-}41)$$

$$d_y=y(t-t_{er})\alpha \quad (2\text{-}42)$$

$$d_z=z(t-t_{er})\alpha \quad (2\text{-}43)$$

式中 $D_n$——管子公称通径，mm；

$\Delta$——管子三个方向热伸长量的向量和，cm；

$L$——管道展开长度，m；

$a$——两固定点间的直线距离，m；

$d_x$——$x$ 方向伸长量，cm；

$d_y$——$y$ 方向伸长量，cm；

$d_z$——$z$ 方向伸长量，cm；

$x$ ——$x$ 方向固定点至弯头的距离，m；

$y$ ——$y$ 方向固定点至弯头的距离，m；

$z$ ——$z$ 方向固定点至弯头的距离，m；

$t$ ——设计温度，℃；

$t_{er}$——设计安装温度，℃；

$\alpha$ ——设计温度下管材的线性膨胀系数，$10^{-6}$/℃。

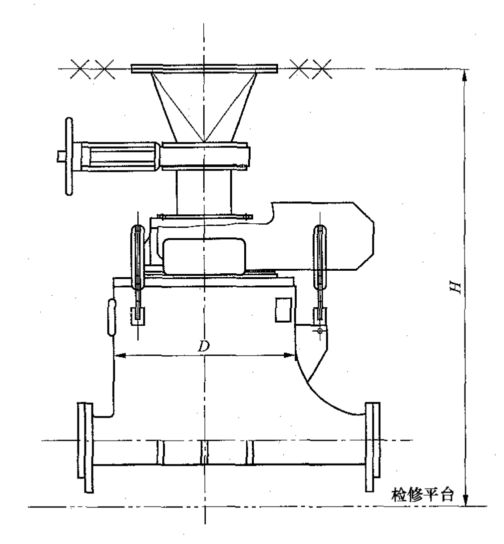
3. 设备选型

浓相气力输送系统目前已成为电厂主流的输灰系统，国内外可提供该系统的公司较多，其输送技术和设备各有特点。以下介绍工程中常见的气力输送系统、设备及阀门：

（1）第一种常用气力输送系统。该浓相气力输送系统根据不同的物料、运行工况和输送距离等，选用不同的输送设备，如 AV 泵、MD 泵、TD 泵、PD 泵、D 泵等。AV 泵和 MD 泵一般用于除尘器灰斗（多个排料点）排灰的短、中距离输送；TD 泵和 PD 泵一般用于集中排料点（如中间灰库）的中、长距离输送；D 泵一般用于底灰、省煤器粗灰和石灰石粉等较粗物料的输送。

1）AV 泵。AV 泵的容积小，一般安装在除尘器后几个电场排灰量少的灰斗下。其结构为整体铸造，只有入口设一个圆顶阀，结构简单，通常采用吊装方式；输灰时各个输灰单元采用循环不间断运行方式，使除尘器灰斗保持不存灰状态。

AV 泵外形参见图 2-9；主要技术参数参见表 2-20。



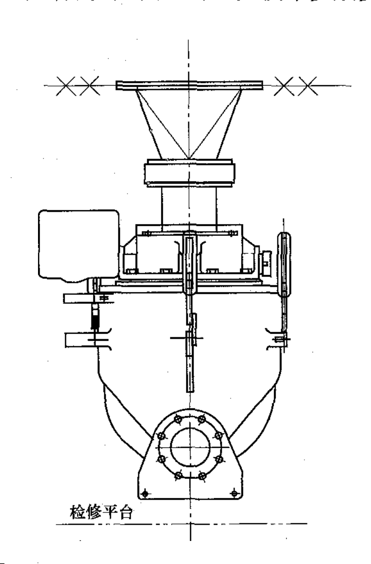




图 2-9 AV 泵外形图

表 2-20 AV 泵主要技术参数

| 序号 | 规格型号 | 入口尺寸 | 出口尺寸 | 设备总高 $H$（mm） | 泵壳体尺寸（mm） | 泵容积（$m^3$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.5/8 | DN200 | DN80～DN100 | 805.5 | 1170×476 | 0.04 |
| 2 | 3.0/8 | | DN80～DN125 | 987.5 | 1414×606 | 0.08 |
| 3 | 4.0/8 | | DN125 | 1122.5 | 1502×606 | 0.11 |
| 4 | 5.0/8 | | DN100～DN200 | 1155.5 | 1157.5×728 | 0.14 |
| 5 | 6.0/8 | | DN100～DN150 | 1365.5 | 1382.5×592 | 0.17 |
| 6 | 8.0/8 | | DN100～DN200 | 1615.5 | 1482.5×592 | 0.23 |
| 7 | 10.0/8 | | DN125～DN200 | 1720.5 | 1557.5×592 | 0.28 |
| 8 | 12.0/8 | | | 2020.5 | 1837.5×892 | 0.34 |

2）MD泵。MD泵一般安装在除尘器前几个电场排灰量较大的灰斗下。进料和出料均采用圆顶阀；输灰时各个输灰单元采用循环不间断运行方式；用于多灰斗排灰的中、短距离集中输送；每台MD泵均配有料位计。

MD泵外形参见图2-10；主要技术参数参见表2-21。

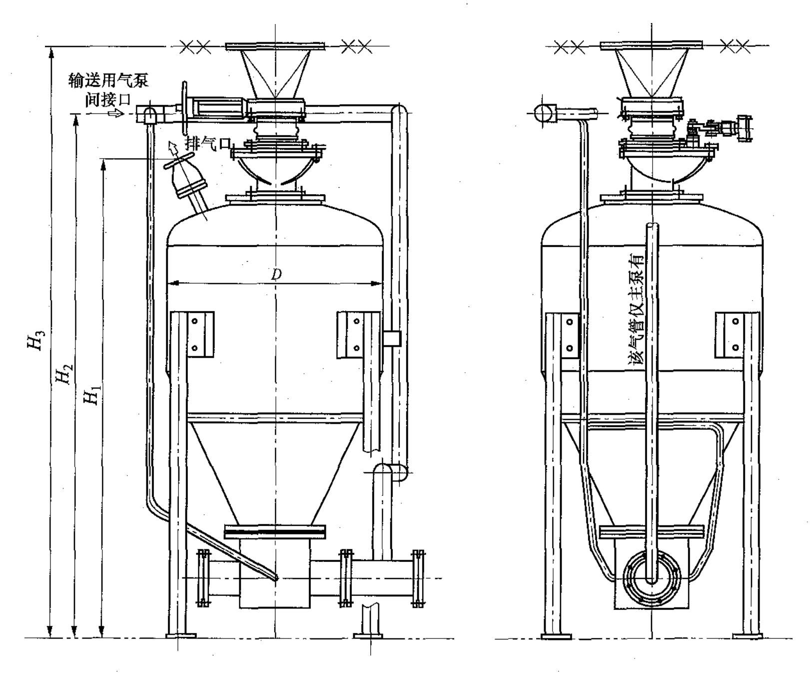



图2-10 MD泵外形图

表2-21 MD泵主要技术参数

| 序号 | 规格型号 | 入口尺寸 | 设备总高 $H_3$（mm） | 泵壳体尺寸（mm） | 泵容积（m³） |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20/8 | DN200 | 2080 | 1000 | 0.57 |
| 2 | 30/8 | | 2456 | 1000 | 0.85 |
| 3 | 45/8 | | 2677 | 1200 | 1.27 |
| 4 | 65/8 | | 2902 | 1400 | 1.84 |
| 5 | 80/8 | | 3179 | 1400 | 2.26 |
| 6 | 100/8 | | 3277 | 1600 | 2.83 |
| 7 | 120/8 | | 3680 | 1600 | 3.40 |

注 泵出口管道直径根据输送出力、输送距离、每组泵的数量和物料粒度进行匹配，常用输送管道规格为DN80～DN250。

3）PD泵。PD泵适合于输送干燥的粉状物料，一般用于集中排料点的输送，单台布置，独立运行。

4）溪流相输送器D泵。D泵适合于输送粒径较大且粒径经常变化的物料，如循环流化床锅炉底渣、省煤器粗灰、石灰石粉等；进料阀和出料阀均采用圆顶阀；可以单泵或双泵并联使用；控制系统可根据管道压力，在线调整出料阀开度，主动防堵；可输送温度超过250℃的物料，在输送高温物料时进料圆顶阀设有冷却水配管。

5）上引式TD泵。TD泵适合于输送干燥的粉状物料，容积大；一般用于集中排料点的输送，单台布置，独立运行。

（2）第二种常用气力输送系统。该系统的气力输送设备主要采用下引式、中引式仓泵，产品系列较多，不同的仓泵结构可适应不同的物料和输送条件及工况。以下主要介绍用于电厂除尘器下的浓相输灰仓泵。

浓相输灰仓泵一般以4～8个为一组作为一个输灰单元安装于除尘器灰斗下，仓泵容积与排灰量匹配。进料阀多采用气动圆盘阀，出料阀采用气动耐磨双闸板阀；输灰时各个输灰单元采用循环不间断运行方式，适合多灰斗排灰的集中输送；每台泵均配有料位计。

不同容积大小的输灰仓泵外形参见图2-11～图2-13；其主要技术参数参见表2-22。

（3）第三种常用气力输送系统（双套管气力输送系统）。双套管气力输送系统不同于其他系统的最大特点是输送管道采用双套管，即在管道上部设有一根直径较小的内管，内管每隔一定间距开有一个特定尺寸的扇形缺口。当输送管道中某处发生物料堵塞时，堵塞前方的输送压力增高而迫使输送气流进入内管，进入内管的压缩气流从堵塞下游的开口以较高的速度流出，从而对该处堵塞的物料产生扰动和吹通作用，保证管内物料的正常输送。其输送原理见图2-14。

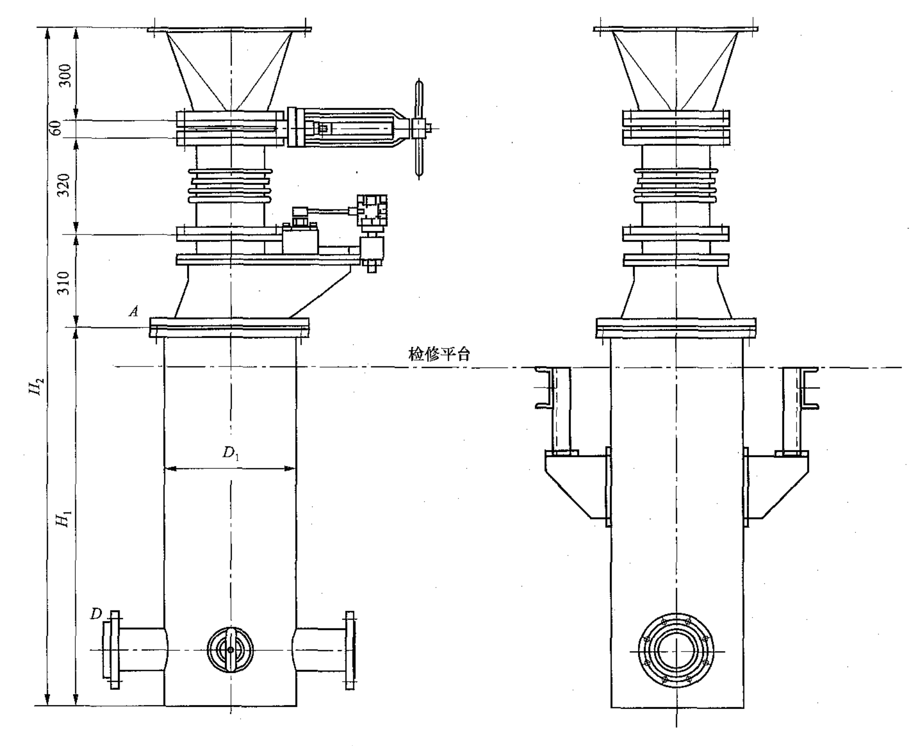



图 2-11 0.15m³ 仓泵外形图

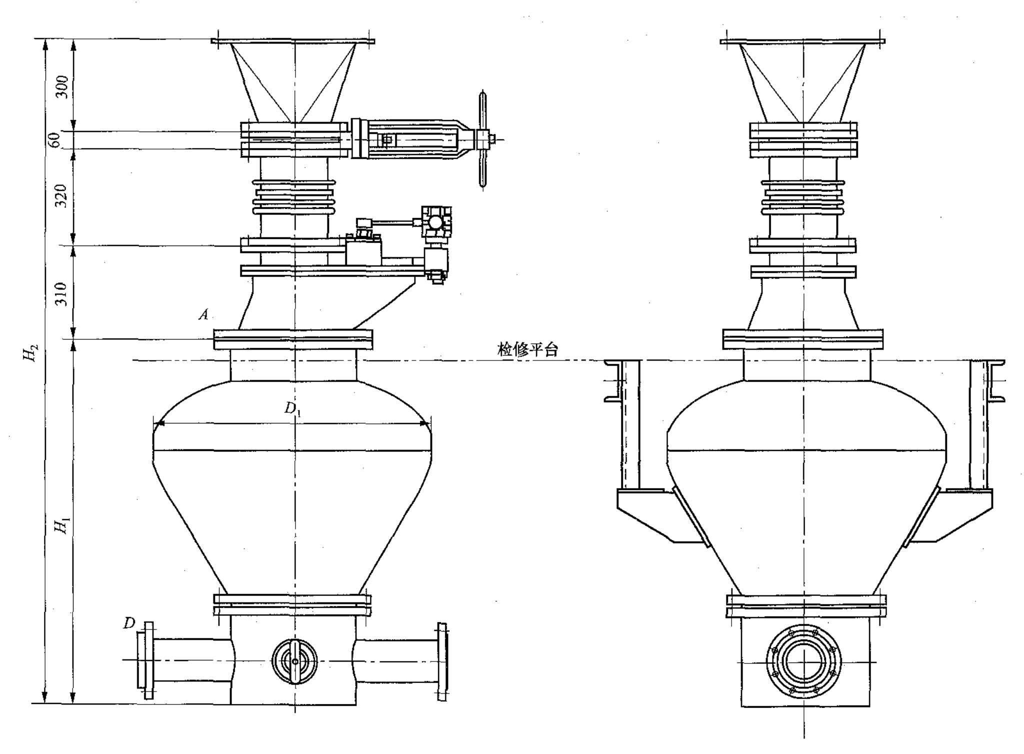



图 2-12 0.25m³ 仓泵外形图

表 2-22　　浓相输灰仓泵主要技术参数

| 序号 | 仓泵容积 ($m^3$) | 仓泵直径 $D_1$（mm） | 仓泵净高 $H_1$（mm） | 所需最小安装高度 $H_2$（mm） | 进料口 A（非标准） | 流化盘 B（非标准） | 平衡阀口 C | 出料口 D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.15 | 400 | 1250 | 2240 | DN400 | 无 | 无 | DN65～DN200 |
| 2 | 0.25 | 900 | 1245 | 2235 | DN400 | 无 | 无 | DN65～DN200 |
| 3 | 0.50 | 1100 | 1370 | 2560 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 4 | 0.75 | 1200 | 1550 | 2740 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 5 | 1.00 | 1200 | 1850 | 3040 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 6 | 1.25 | 1200 | 2050 | 3240 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 7 | 1.50 | 1300 | 2110 | 3300 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 8 | 2.00 | 1400 | 2250 | 3440 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 9 | 2.50 | 1500 | 2470 | 3660 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 10 | 3.00 | 1600 | 2635 | 3825 | DN400 | DN400 | DN65 | DN65～DN200 |
| 11 | 3.50 | 1600 | 2835 | 4025 | DN400 | DN400 | DN80 | DN65～DN200 |
| 12 | 4.00 | 1800 | 2820 | 4010 | DN400 | DN400 | DN80 | DN65～DN200 |
| 13 | 4.50 | 1800 | 3020 | 4210 | DN400 | DN400 | DN80 | DN65～DN200 |
| 14 | 5.00 | 1800 | 3220 | 4410 | DN400 | DN400 | DN80 | DN65～DN200 |

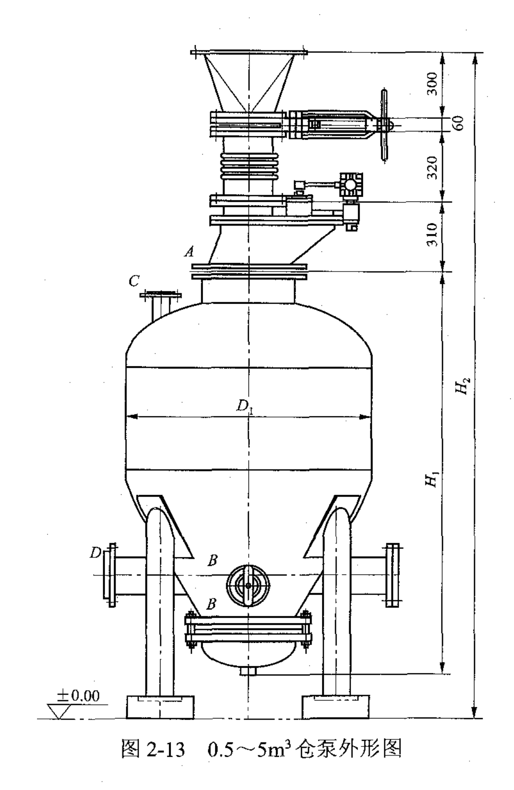



图 2-13　0.5～5m³ 仓泵外形图

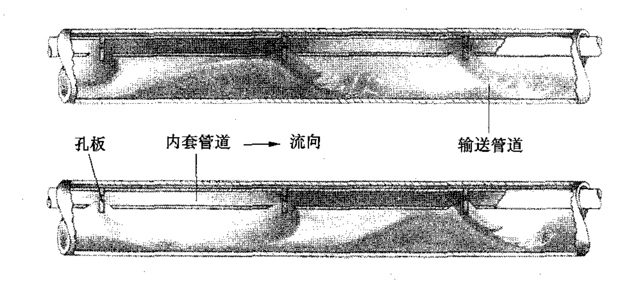



图 2-14　双套管气力输送管道原理图

双套管气力输送系统的输送设备采用输送罐，为一种下引式仓泵，用于输送除尘器、省煤器飞灰、水泥、石灰石粉等粉状物料。输送罐的进料阀和出料阀一般采用圆顶阀；每台泵均配有料位计。

典型输送罐外形见图 2-15，其主要技术参数见表 2-23 和表 2-24。

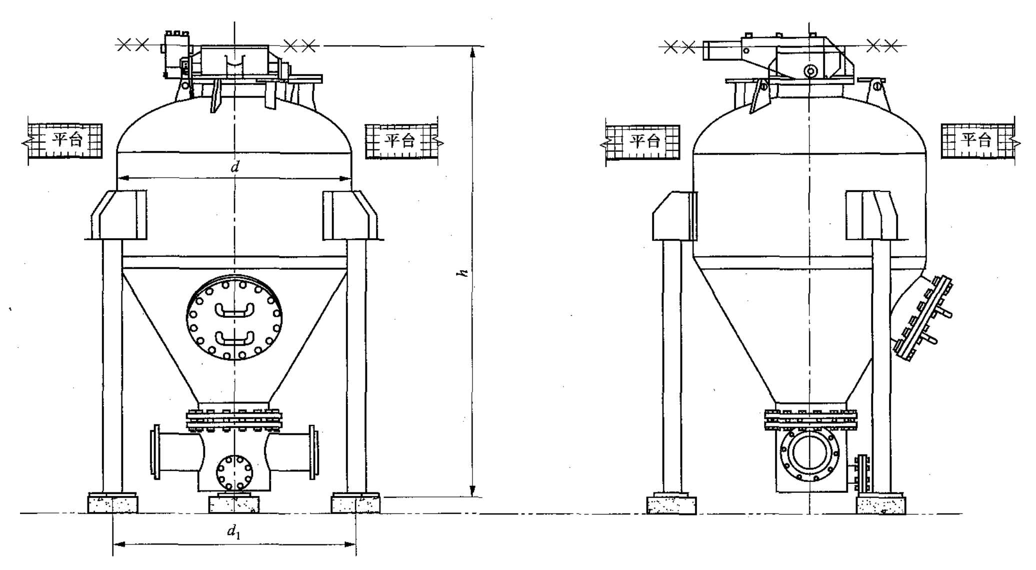



图 2-15 典型输送罐外形图

表 2-23 常温型输送罐技术参数

| 容积（m³） | 型号 | 罐体直径 $d$（mm） | 罐体高度 $h$（mm） | 罐体壁厚（mm） | 支腿直径 $d_1$（mm） | 支腿数量 | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 进料口径 DN150 | | | | | | | |
| 0.5 | 050 | 1020 | 1700 | 10 | 1300 | 2 | 650 |
| 0.75 | 075 | 1220 | 1925 | 10 | 1500 | 3 | 800 |
| 1.0 | 100 | 1220 | 2145 | 10 | 1500 | 3 | 900 |
| 1.5 | 150 | 1420 | 2330 | 10 | 1600 | 3 | 1080 |
| 进料口径 DN200 | | | | | | | |
| 0.5 | 050 | 1020 | 1700 | 10 | 1300 | 2 | 650 |
| 0.75 | 075 | 1220 | 1925 | 10 | 1500 | 3 | 800 |
| 1.0 | 100 | 1220 | 2145 | 10 | 1500 | 3 | 900 |
| 1.5 | 150 | 1420 | 2330 | 10 | 1600 | 3 | 1080 |
| 2.0 | 200 | 1420 | 2650 | 10 | 1600 | 3 | 1130 |
| 2.5 | 250 | 1620 | 2680 | 10 | 1800 | 3 | 1240 |
| 3.0 | 300 | 1620 | 2930 | 10 | 1800 | 3 | 1360 |
| 3.5 | 350 | 1824 | 3150 | 12 | 2000 | 3 | 1450 |
| 4.0 | 400 | 1824 | 3350 | 12 | 2000 | 3 | 1530 |
| 进料口径 DN300 | | | | | | | |
| 2.0 | 200 | 1420 | 2650 | 10 | 1600 | 3 | 1130 |
| 2.5 | 250 | 1620 | 2670 | 10 | 1800 | 3 | 1240 |
| 3.0 | 300 | 1620 | 2930 | 10 | 1800 | 3 | 1360 |
| 3.5 | 350 | 1824 | 3150 | 12 | 2000 | 4 | 1450 |
| 4.0 | 400 | 1824 | 3350 | 12 | 2000 | 4 | 1530 |
| 6.0 | 600 | 1824 | 3800 | 12 | 2000 | 4 | 2470 |
| 偏差范围 | | | | | | | |
| ±0.01 | — | ±2 | ±5 | ±0.3 | ±5 | — | — |

表 2-24　　高温型输送罐技术参数

| 容积（m³） | 型号 | 罐体直径 $d$（mm） | 罐体高度 $h$（mm） | 罐体壁厚（mm） | 支腿直径 $d_1$（mm） | 支腿数量 | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 进料口径 DN150 | | | | | | | |
| 0.5 | 050 | 1024 | 1700 | 10 | 1300 | 2 | 650 |
| 0.75 | 075 | 1220 | 1925 | 10 | 1500 | 3 | 800 |
| 1.0 | 100 | 1220 | 2145 | 10 | 1500 | 3 | 900 |

（4）其他浓相气力输送系统。除了以上几种常用的系统以外，还有上引式小仓泵和助推式高浓度气力输送等其他浓相气力输送系统。

1）上引式小仓泵系统。该系统以上引式高浓度输送泵为发送设备，由多台仓泵组成一个输送单元，输送过程中同一输送单元的仓泵采取同时运行的方式，一个输送单元设置一组进气阀组件、一个出料阀。

2）助推式高浓度气力输送系统。该系统在输灰管道的沿线、每隔一定距离分布安装若干空气助推器。输送用气并不全部加入仓泵，加入仓泵的空气只是起到将物料喂入管道的作用，另外的空气通过助推器直接加入管道。通过助推器加入管道的空气可使物料获得克服管道阻力所必需的能量。由于被输送的物料在输送管中呈集团流态或栓状流态，而非完全悬浮状态，克服管道阻力的能量主要是压能，物料运动速度低，从而可以大大降低系统的耗气量，并有效降低管道磨损。即使物料在管道中发生停滞，无论输送距离有多长，助推器都能使之重新启动。

（5）常用阀门。仓泵气力输送系统的进料阀、出料阀和管道切换阀等一般选用专用的气动阀门，常用的类型有圆顶阀、双闸板阀、圆盘阀等。

1）圆顶阀。圆顶阀结构见图 2-16，其阀芯为表面光滑穹形体，关闭和开启时通过橡胶密封圈的充压与卸压，使阀体与阀芯之间柔性密封，阀芯光滑坚硬的表面可以保证与橡胶密封圈良好的紧密接触，并具有实时自动监测密封气压、智能报警功能，不仅可以确保密封的可靠性，还能随时发现密封圈泄漏，及时更换，防止恶性循环，损坏阀门。圆顶阀开启后形成全通道，完全可以避免流动物料对阀芯表面的磨损。

圆顶阀仅适合于阀门两端无压差工况下开启和关闭，因此通常用作仓泵的进料阀、灰库下卸料阀和采用无压开泵的仓泵装置的出料阀等。由于圆顶阀的橡胶密封圈耐高温性不够，作为省煤器仓泵进料阀时，应采用有隔热层的耐高温型圆顶阀。

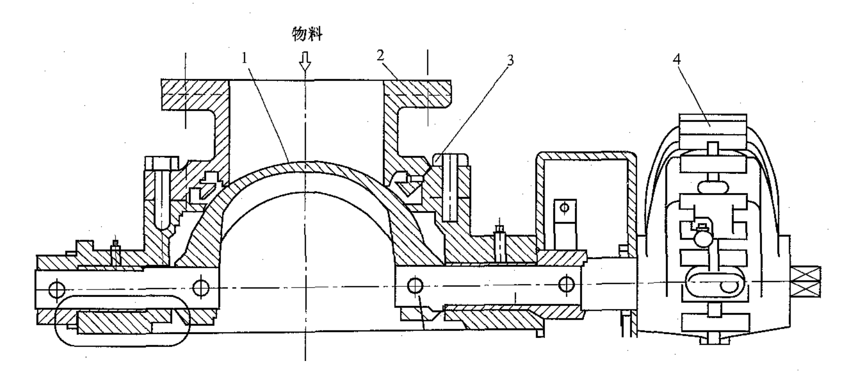



图 2-16　圆顶阀结构图

1—圆顶阀瓣；2—阀体；3—充气密封圈；4—汽缸

典型的常温型圆顶阀主要技术参数见表 2-25。由于各个阀门厂家的参数有所区别，表 2-25 中数据仅供设计时参考。

表 2-25　　典型常温型气动圆顶阀技术参数

| 序号 | 规格 | 公称通径 DN（mm） | 设计压力（MPa） | 设计温度（℃） | 安装高度 $H$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 一 | 标准圆顶阀 | | | | | |
| 1 | 50 | 50 | 1.0 | <200 | 188 | 17 |
| 2 | 80 | 80 | 1.0 | <200 | 228 | 26 |

续表

| 序号 | 规格 | 公称通径 DN（mm） | 设计压力（MPa） | 设计温度（℃） | 安装高度 $H$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 80PH1 | 80 | 1.0 | <200 | 245 | 25 |
| 4 | 100 | 100 | 1.0 | <200 | 139 | 63 |
| 5 | 100PH1 | 100 | 1.0 | <200 | 159 | 63 |
| 6 | 150 | 150 | 1.0 | <200 | 168 | 115 |
| 7 | 150PH1 | 150 | 1.0 | <200 | 187 | 110 |
| 8 | 200 | 200 | 1.0 | <200 | 205 | 125 |
| 9 | 200PH1 | 200 | 1.0 | <200 | 220 | 140 |
| 10 | 250 | 250 | 1.0 | <200 | 247 | 260 |
| 11 | 300 | 300 | 1.0 | <200 | 283 | 280 |
| 12 | 300PH1 | 300 | 1.0 | <200 | 295 | 280 |
| 二 | 管路圆顶阀 | | | | | |
| 1 | 100 | 100 | 1.0 | <200 | 350 | 65 |
| 2 | 125 | 125 | 1.0 | <200 | 450 | 115 |
| 3 | 150 | 150 | 1.0 | <200 | 450 | 120 |
| 4 | 200 | 200 | 1.0 | <200 | 485 | 163 |
| 5 | 250 | 250 | 1.0 | <200 | 565 | 270 |

注 耐高温型圆顶阀的设计温度为400℃，其他参数不变。

2）双闸板阀。双闸板阀，也称双插板阀，其结构见图2-17，该阀有上、下两块采用耐磨材料制成的阀板，通过阀杆带动阀板做垂直运动，阀板与密封环之间加载弹簧，弹簧力始终使阀板压向密封环，又容许阀板在垂直上下方向移动，不仅有助于补偿阀门零部件的热胀冷缩，还能克服任何背压变化对密封的影响，以及防止颗粒介质进入两密封面之间。在启闭过程中，阀板能产生自转，使得密封面之间产生研磨、抛光作用。由于阀体对通道的偏心，在开启排卸物料时，阀腔内会产生涡流，起到自动清扫阀门内腔的作用，当填料磨损时，依靠弹簧力自动压紧填料。

双闸板阀具有密封性能好、安装无方向限制等特点，金属双闸板阀和衬陶瓷双闸板阀的耐温都可以达到400℃，可适用于省煤器和除尘器下仓泵的进、出料阀和平衡阀、管道切换阀、排堵阀等。

典型双闸板阀的主要技术参数见表2-26。由于各个阀门厂家的参数有所区别，表2-26中数据仅供设计时参考。

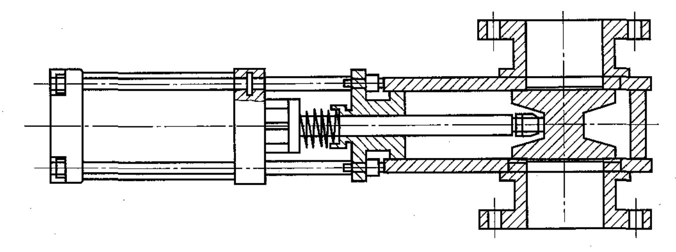


图2-17 双闸板阀结构图

表2-26 典型气动双闸板阀技术参数

| 序号 | 规格 | 公称通径 DN（mm） | 设计压力（MPa） | 设计温度（℃） | 安装高度 $H$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 65 | 65 | 1.0 | ≤400 | 240 | 约43 |
| 2 | 80 | 80 | 1.0 | ≤400 | 260 | 约47 |

续表

| 序号 | 规格 | 公称通径<br>DN（mm） | 设计压力<br>（MPa） | 设计温度<br>（℃） | 安装高度<br>$H$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 100 | 100 | 1.0 | ≤400 | 305 | 约 52 |
| 4 | 125 | 125 | 1.0 | ≤400 | 380 | 约 82 |
| 5 | 150 | 150 | 1.0 | ≤400 | 402 | 约 107 |
| 6 | 175 | 175 | 1.0 | ≤400 | 410 | 约 125 |
| 7 | 200 | 200 | 1.0 | ≤400 | 420 | 约 157 |
| 8 | 225 | 225 | 1.0 | ≤400 | 438 | 约 180 |
| 9 | 250 | 250 | 1.0 | ≤400 | 457 | 约 213 |
| 10 | 300 | 300 | 1.0 | ≤400 | 500 | 约 282 |

3）圆盘阀。圆盘阀结构见图 2-18，通过旋转轴带动阀板运动，使得阀门开关动作时的运动为旋转运动。气动执行机构的活塞杆不与介质直接接触，延长了执行机构的使用寿命。密封副采用硬质合金、陶瓷等耐磨材料，具有较好的机械性能和耐磨性能，解决了密封面因物料冲刷而易被冲蚀、寿命不高的问题。

由于圆盘阀阀板旋转启闭能有效铲除阀腔内的堆积物，料口全流通无阻挡物，卡灰现象较少，因此可作为进料阀、出料阀及排气阀等使用，圆盘阀具有与双闸板阀类似的优点，适合于带压启闭的工况。

典型气动圆盘阀的主要技术参数见表 2-27。由于各个阀门厂家的参数有所区别，表 2-27 中数据仅供设计时参考。

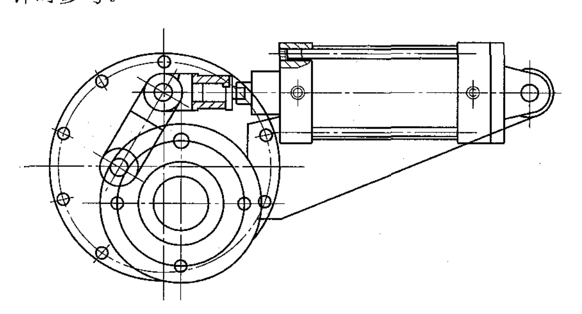


图 2-18 圆盘阀结构图

表 2-27 典型气动圆盘阀技术参数

| 序号 | 型号 | 公称通径<br>DN（mm） | 设计压力<br>（MPa） | 设计温度<br>（℃） | 安装高度<br>$H$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 一 | 单阀板圆盘阀（主要用于进料阀、排气阀） | | | | | |
| 1 | J50×50 | 50 | 1.0 | ≤400 | 320 | 37 |
| 2 | J65×65 | 65 | 1.0 | ≤400 | 330 | 47 |
| 3 | J80×80 | 80 | 1.0 | ≤400 | 330 | 56 |
| 4 | J100×100 | 100 | 1.0 | ≤400 | 345 | 69 |
| 5 | J150×150 | 150 | 1.0 | ≤400 | 310 | 98 |
| 6 | J200×200 | 200 | 1.0 | ≤400 | 310 | 123 |
| 7 | J200×350 | 200 | 1.0 | ≤400 | 310 | 150 |
| 8 | J225×225 | 225 | 1.0 | ≤400 | 310 | 145 |
| 9 | J250×250 | 250 | 1.0 | ≤400 | 330 | 170 |
| 10 | J250×350 | 250 | 1.0 | ≤400 | 330 | 196 |
| 11 | J275×275 | 275 | 1.0 | ≤400 | 330 | 190 |
| 12 | J275×450 | 275 | 1.0 | ≤400 | 330 | 230 |
| 13 | J300×300 | 300 | 1.0 | ≤400 | 330 | 210 |
| 14 | J300×450 | 300 | 1.0 | ≤400 | 330 | 255 |

续表

| 序号 | 型号 | 公称通径 DN（mm） | 设计压力（MPa） | 设计温度（℃） | 安装高度 *H*（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 二 | 单阀板圆盘阀（主要用于出料阀） | | | | | |
| 1 | J50×50 | 50 | 1.0 | ≤400 | 267 | 40 |
| 2 | J65×65 | 65 | 1.0 | ≤400 | 280 | 49 |
| 3 | J80×80 | 80 | 1.0 | ≤400 | 280 | 66 |
| 4 | J100×100 | 100 | 1.0 | ≤400 | 285 | 75 |
| 5 | J125×125 | 125 | 1.0 | ≤400 | 300 | 95 |
| 6 | J150×150 | 150 | 1.0 | ≤400 | 300 | 115 |
| 7 | J175×175 | 175 | 1.0 | ≤400 | 347 | 138 |
| 8 | J200×200 | 200 | 1.0 | ≤400 | 347 | 178 |
| 9 | J225×225 | 225 | 1.0 | ≤400 | 335 | 190 |
| 10 | J250×250 | 250 | 1.0 | ≤400 | 360 | 210 |
| 11 | J275×275 | 275 | 1.0 | ≤400 | 360 | 245 |
| 12 | J300×300 | 300 | 1.0 | ≤400 | 360 | 310 |

4. 系统图

第一种常用气力输送系统见图 2-19 和图 2-22，第二、第三种常用气力输送系统见图 2-20 和图 2-21。

5. 系统设计运行指标参考

典型电厂浓相气力输送系统的设计运行参数见表 2-28，供设计时参考。

**表 2-28　　典型电厂的浓相气力输送系统设计运行参数**

| 序号 | 电厂及容量 | 设计燃煤 | 输送物料 | 设计出力（t/h） | 输送当量距离（m） | 浓相气力输送系统配置 | 实际出力（t/h） | 实际气量（$m^3$/min） | 料气比 | 输送压损（kPa） | 物料堆积密度（$t/m^3$） | 物料中位径（μm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 西南地区某电厂 2×1000MW | 神华煤 | 电除尘器飞灰 | 2×120 | 405 | 每炉 60 台仓泵，出 4 根输灰管（一、二电场 2 根 DN175，三、四、五电场 2 根 DN150） | 2×120 | 2×46 | 37.2 | 260～300 | 0.8 | |
| 2 | 江苏某电厂 2 号炉 1×1000MW | 山西贫煤 | 电除尘器飞灰 | 186 | 1153 | 每炉 48 台仓泵，出 4 根输灰管（2 根 DN225/250/300，2 根 DN225/250/275） | 186 | 184 | 14 | 220～250 | 0.8 | 79 |
| 3 | 广东某电厂 2 号炉 1×1000MW | 印尼无烟煤 | 电除尘器飞灰 | 216 | 572 | 每炉 60 台仓泵，出 4 根输灰管（3 根 DN200/225/275，1 根 DN125/150/175） | 218 | 113 | 27 | 150 | — | — |
| 4 | 湖北某电厂 5 号炉 1×1000MW | 烟煤和褐煤的混煤 | 电除尘器飞灰 | 210 | 260～340 | 每炉 60 台仓泵，出 4 根输灰管（3 根 DN200/225，1 根 DN125/150） | 246 | 102 | 33 | 120～150 | — | — |
| 5 | 内蒙古某电厂 2 号炉 1×600MW | 霍林河褐煤 | 电除尘器飞灰 | 172 | 690 | 每炉 40 台仓泵，出 4 根输灰管（2 根 DN200/225/250，1 根 DN150/175/200，1 根 DN125/150/175） | 212 | 105 | 28 | 230 | 0.8 | 72 |
| 6 | 河南某电厂二期 1 号炉 1×350MW | 河南烟煤 | 省煤器灰、脱硝灰 | 3.9 | 140 | 每炉省煤器 4 台仓泵，脱硝灰斗 5 台仓泵，公用 1 根 DN65 输灰管 | 4.5 | 3～3.6 | 17～21 | 150 | — | — |

续表

| 序号 | 电厂及容量 | 设计燃煤 | 输送物料 | 设计出力（t/h） | 输送当量距离（m） | 浓相气力输送系统配置 | 实际出力（t/h） | 实际气量（$m^3$/min） | 料气比 | 输送压损（kPa） | 物料堆积密度（t/$m^3$） | 物料中位径（μm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 河南某电厂 1×600MW | 平顶山烟煤 | 电除尘器飞灰 | 127 | 约 300 | 每炉 32 台仓泵，出 4 根输灰管（一电场 2 根 DN200，二电场 DN200，三、四电场 DN150） | 128 | 37 | 48 | 约 200 | 0.7 | 91 |
| 8 | 湖北某电厂一期 1×330MW | 王庄贫煤 | 电除尘器飞灰 | 42 | 约 750 | 每炉 20 台仓泵，出 3 根输灰管（一电场 DN200，二电场 DN150，三、四、五电场 DN100） | 42 | 21 | 28 | 约 280 | 0.67 | 67 |
| 9 | 江苏某电厂 4 号炉 1×1000MW | 神华烟煤 | 电除尘器飞灰 | 145 | 1132 | 每炉配 48 台仓泵，出 4 根输灰母管 | 145 | 108 | 19 | — | 0.76 | 53 |
| 10 | 云南某电厂 10 号炉 1×300MW | 宣威烟煤 | 除尘器一电场飞灰 | 80 | 约 980 | 一电场配 4 台仓泵，出 1 根输灰母管 | 80 | 62 | 19 | 350 | 0.8 | — |
| 11 | 内蒙古某电厂 3 号炉 1×600MW | 本地煤 | 电袋除尘器飞灰 | 206 | 372 | 每炉 32 台仓泵，出 4 根输灰管（一、二电场 2 根 DN200/225/250，一、二袋区 2 根 DN125/150） | 206 | 102 | 29 | 130～200 | — | — |
| 12 | 内蒙古某电厂 1 号炉 1×660MW | 本地褐煤 | 电除尘器飞灰 | 180 | 390～540 | 每炉 60 台仓泵，出 5 根输灰管（一、二电场 3 根 DN200，三、四、五电场 2 根 DN150） | 180 | 约 116 | 25 | — | — | — |
| 13 | 山西某电厂 2×300MW CFB | 中煤、煤矸石和煤泥 | 布袋除尘器飞灰 | 2×132 | 约 450 | 每炉 8 台仓泵，出 2 根输灰管（布袋除尘器两排灰斗共出 2 根 DN200/225/250） | 2×132 | 2×68 | 27 | 约 280 | — | — |
| 14 | 贵州某电厂 1 号炉 1×660MW | 贵州本地烟煤 | 电袋除尘器飞灰 | 188 | 约 352 | 每炉 40 台仓泵，出 5 根输灰管（一、二电场 4 根 DN225，一、二、三袋区 1 根 DN200） | 188 | 90 | 29 | 约 250 | — | — |
| 15 | 湖北某电厂 2×300MW CFB | 贵州和本地混煤 | 布袋除尘器飞灰 | 2×106 | 约 360 | 每炉 12 台仓泵，出 4 根输灰管（一、二、三、四个袋区共出 4 根 DN125/150） | 2×106 | 2×43 | 33 | 约 260 | — | — |
| 16 | 土耳其某电厂 2 号炉 1×600MW | 进口煤 | 电除尘器飞灰 | 60 | 892～938 | 每炉 40 台仓泵，出 3 根输灰管（一、二电场 2 根 DN200/225/250，三、四、五电场 1 根 DN125/150） | 61 | 54 | 17 | 120～185 | — | — |
| 17 | 湖北某热电厂 1×410t/h CFB | 劣质煤 | CFB 锅炉底渣 | 20 | 约 300 | 每炉 4 台仓泵，出 2 根输渣管（DN80 变径至 DN100，再变径至 DN125） | 20 | 27 | 11 | — | 约 1.2 | 2508 |
| 18 | 四川某电厂 1×600MW CFB | 劣质煤 | 石灰石粉 | 2×55 | 约 360 | 粉仓下安装 3 套仓螺体，2 运 1 备，合出 2 根输送管道 | 2×55.3 | 约 144 | 6.9 | 约 360 | 约 1.2 | 260 |
| 19 | 山西某电厂 1×200MW CFB | 劣质煤 | 石灰石粉 | 36.8 | 约 260 | 每炉 2 台 Rotofeed 泵，出 2 根输送管道（DN125 变径至 DN150，入炉分为 6 根 DN100） | 36.8 | 93.4 | 6 | 约 150 | 约 1.34 | 338 |

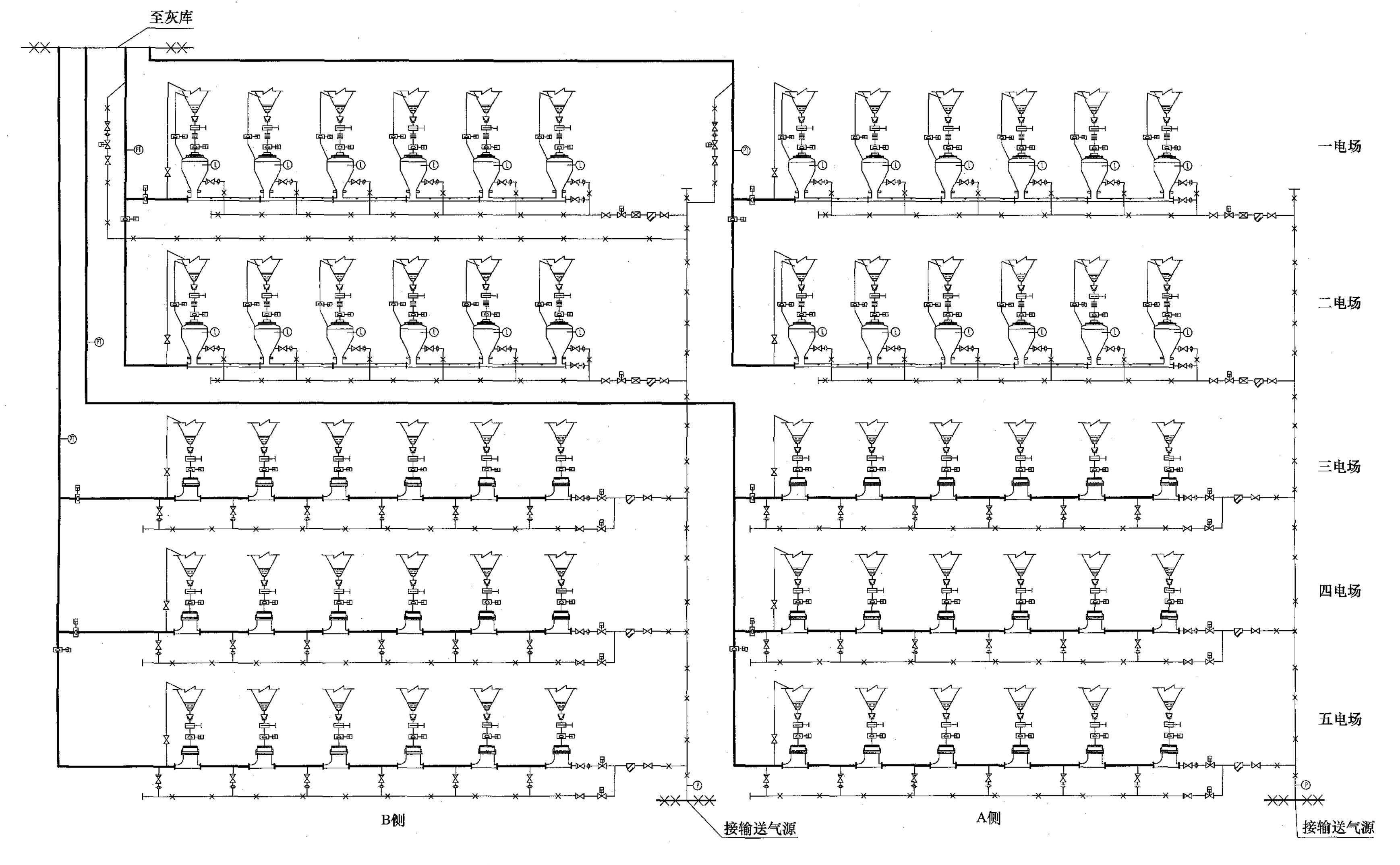



图2–19 典型浓相气力输送系统图（一）

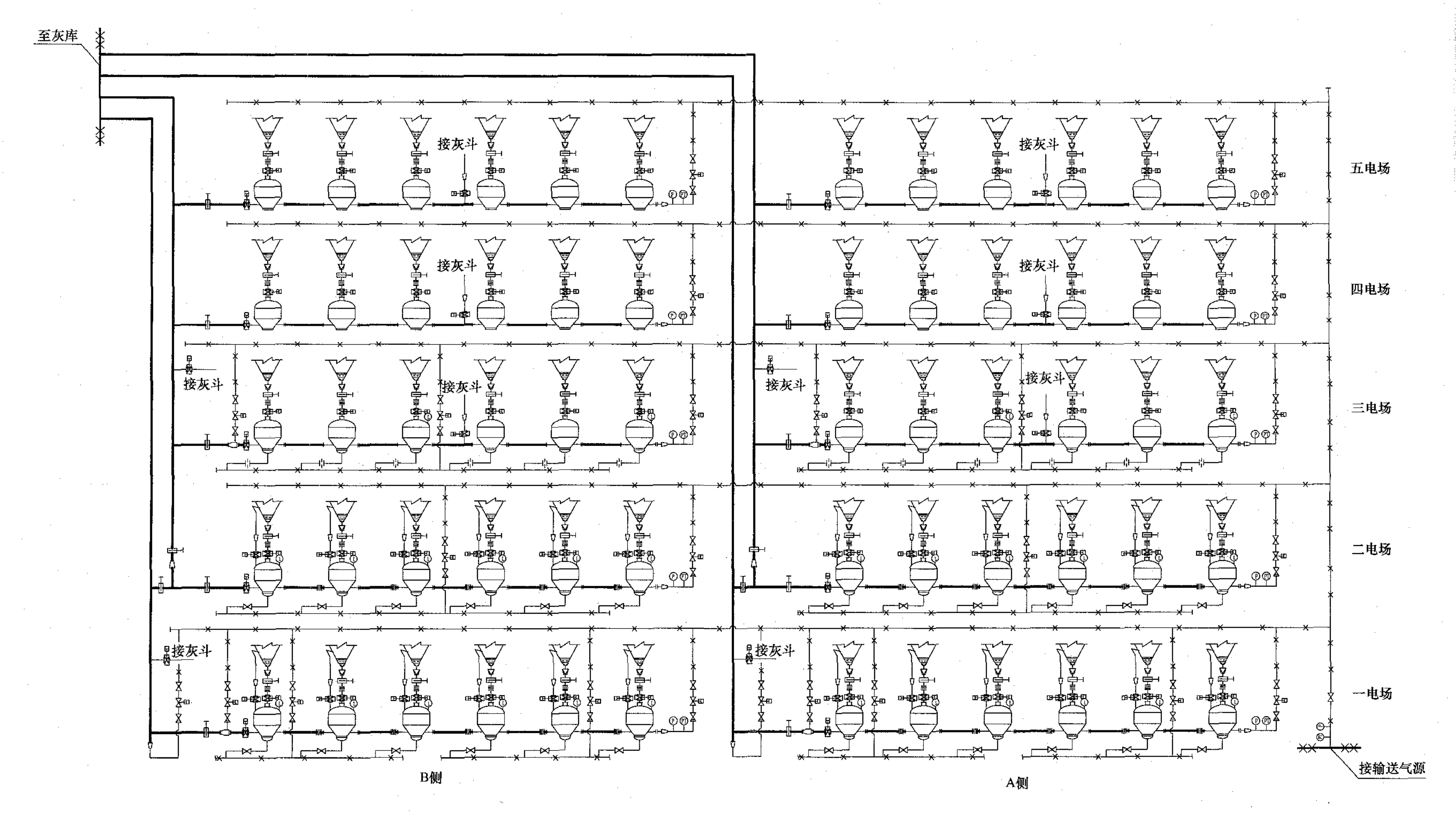



图 2-20　典型浓相气力输送系统图（二）

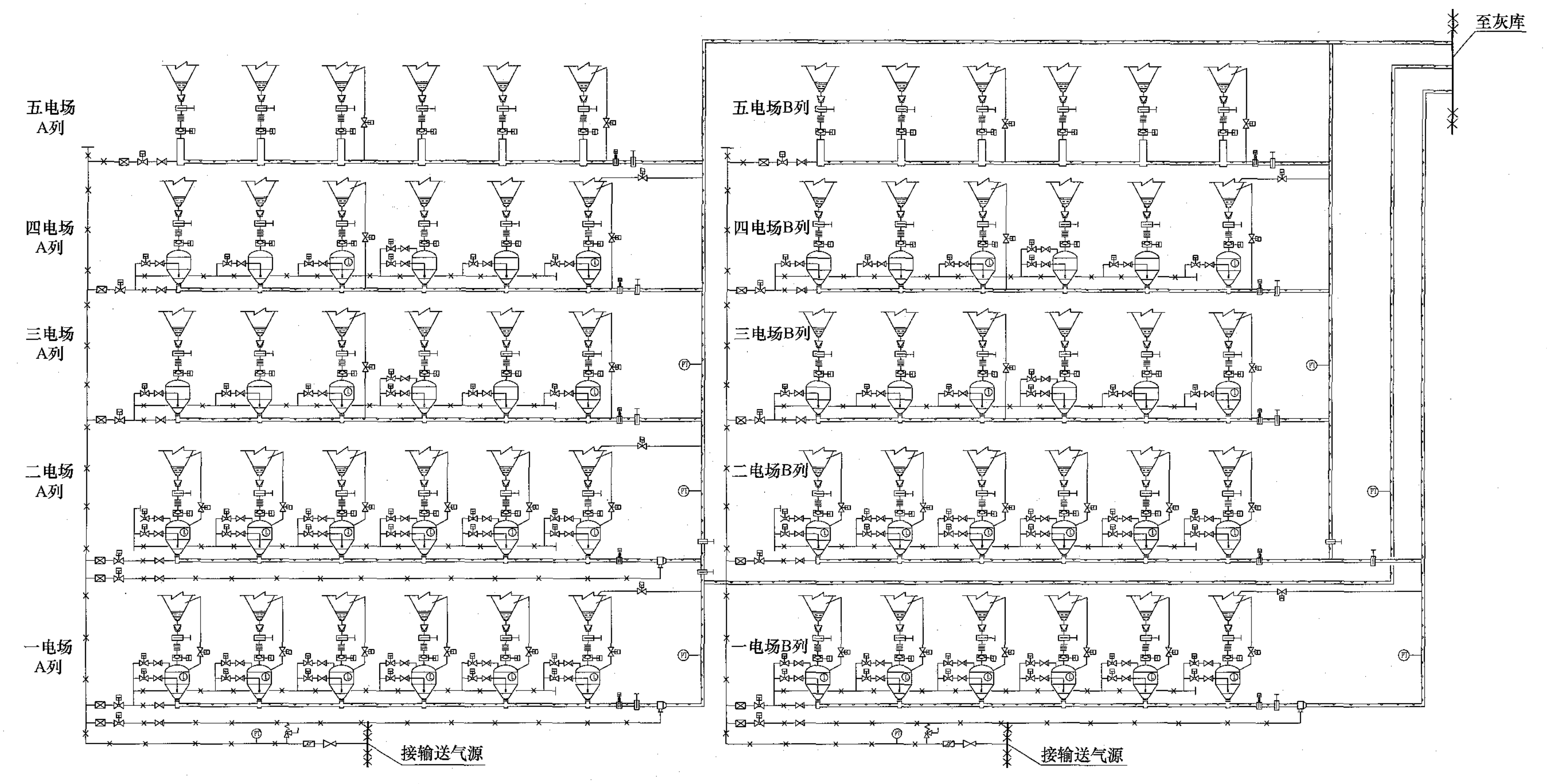



图 2–21　典型浓相气力输送系统图（三）

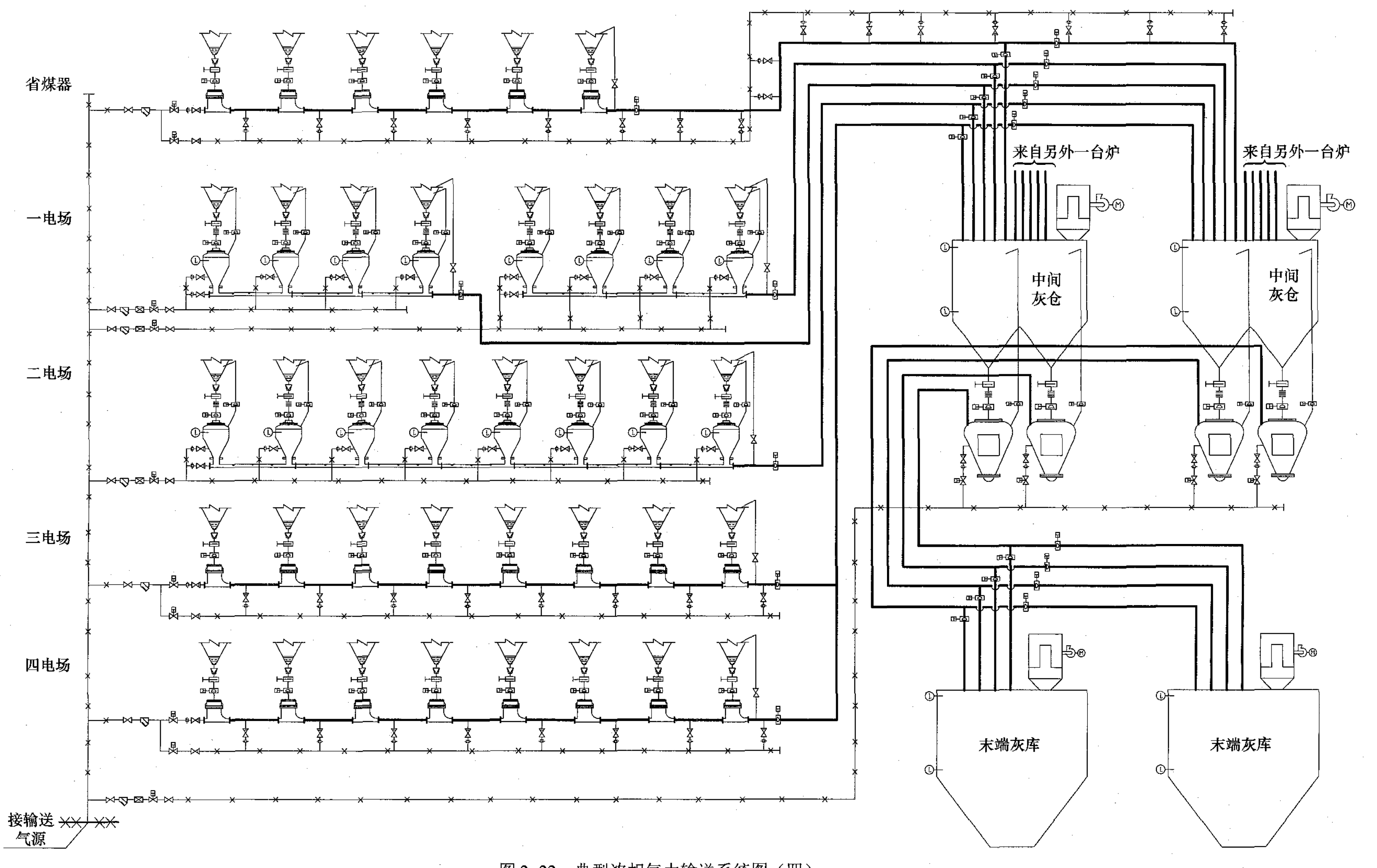



图 2–22　典型浓相气力输送系统图（四）

## 第三节 负压气力输送系统

负压气力输送系统，是指利用抽真空设备在输送管道内形成负压，将物料从排放点抽吸输送至料仓的系统，属于一种稀相悬浮流输送。目前抽真空设备一般采用负压罗茨风机或水环式真空泵。

负压气力输送系统在电厂一般用于灰渣等物料的短距离集中输送；系统由物料输送阀、输送管道、收尘设备和抽真空设备等组成，辅助系统有气物料储存系统和控制系统等。

### 一、设计要求

系统及布置的设计原则和要求如下：

（1）当用于输灰时，负压气力输送系统的设计出力不宜小于锅炉最大连续蒸发量工况、燃用设计煤种时排灰量的200%，且不宜小于燃用校核煤种时排灰量的150%。

（2）当用于输渣时，负压气力输渣系统宜每炉设2套系统，1套运行，1套备用。每套系统的设计出力不宜小于锅炉最大连续蒸发量工况、燃用设计煤种时排灰量的150%，且不宜小于燃用校核煤种时排灰量的120%。

（3）负压气力输送系统出力计算中，应核算距烟气除尘器最近端和最远端灰斗的输灰出力。负压风机宜根据距除尘器最远端灰斗的输灰出力配置，库顶收尘器宜根据距除尘器最近端灰斗的输灰出力配置。

（4）系统设计和计算时，一般输送料气比按10～25kg/kg考虑。

（5）负压气力输送系统的始端最低流速宜取10～12m/s，末端流速不宜超过30m/s。

（6）系统的设计输送距离一般不超过150m，单根管道的出力不宜超过60t/h。

（7）负压气力输送系统要求在每个灰斗下装设一套手动插板阀和物料输送阀（也称为受灰器），手动插板阀供检修用。

（8）对于有多个输灰分支管道的负压气力输送系统，每个分支管道由气动干灰阀与主输灰管道隔离，在每根分支管始端还应设有自动进风阀。

（9）在任何时间内，对应一路主输灰管道只允许一路输灰支管运行，且只有一个灰斗的物料输送阀打开输灰。自动控制时，按主输灰管道真空值，依据程序命令实现各个灰斗的排空，当某个灰斗出现高料位时，应优先运行。手动控制时，操作者可以任意选择灰斗及改变灰斗的排空时间。

（10）由于负压气力输送系统末端气灰分离设备结构复杂、占地面积较大，故一般每2～4根主输灰管道对应设1座直径为9～15m的灰库。每两根主输灰管道间宜设置切换阀组，以实现库顶收尘设备互为备用。

（11）负压气力输送系统的抽真空设备宜采用罗茨负压风机，风机入口前宜设冷却器。

（12）负压气力输送系统中气灰的分离宜由集分离、过滤、气锁阀装置为一体的组合（布袋）式收尘器来完成。同时，每座灰库还应设有布袋式排气过滤器。当采用组合式收尘器或布袋式收尘器作为收尘设备时，布袋式收尘器风速不宜大于0.8m/min，布袋式收尘器效率不应小于99.9%。布袋式收尘器应装有自动脉冲反吹装置，吹扫用的空气品质应达到仪用空气品质，其压力和耗气量按制造厂提供的资料选取。

（13）负压气力输送系统中输送分支管上设置的气动切换阀应尽量靠近输送母管布置。

（14）物料输送阀一般采用地上布置，其底部与地面的净空距离满足阀门等的检修要求。

（15）负压气力输灰管道的设计要求与稀相气锁阀系统相同，负压气力输渣管道宜采用耐磨管。

### 二、设计计算

以负压气力输灰为例，说明负压气力输送系统的设计计算。

1. 计算原始资料

设计原始资料与气锁阀系统相同。

2. 系统基本数据计算

（1）系统出力$G$。负压气力输送系统的设计出力按不小于锅炉BMCR工况、燃用设计煤种时排灰量的200%设计，同时应不小于燃用校核煤种时灰量的150%

$$G=200\%G_h \tag{2-44}$$

式中　$G_h$——系统对应的锅炉设计工况下排灰量，t/h。

（2）管道输送距离参数。负压气力输送系统有关的输送管道距离参数为：①输送管道的几何长度$L$（m）；②管道的垂直升高$H$（m）；③90°弯头个数$N$（当弯头小于90°时，折算为90°弯头）。

（3）输送灰气比$\mu$。系统输送灰气比$\mu$与输送距离、灰的特性等有关。一般输送距离越长，则灰气比越小。为了便于系统计算，一般先按以下经验数据选取，再进行复核计算后修正：

对于负压气力除灰，$\mu$=15～25（灰）kg/（气）kg；对于负压气力除渣，$\mu$=5～15（渣）kg/（气）kg。

（4）输送系统所需的空气量。负压气力输送系统所需的空气质量流量$q_m$、标准状态下的空气体积流量$q_0$和管道任意点的体积流量$q_V$可分别按式（2-2）、式（2-3）和式（2-4）进行初算。

（5）气灰混合物温度。与稀相气锁阀系统相同，负压气力输送系统的出力等按能量法计算，假定管道内的气体流动与外界不存在热交换，将输送近似考虑为定温绝热过程。

（6）输送速度。气力除灰的输送速度一般应根据物料输送试验来确定，由于负压气力输送系统中干灰在输送管道内属悬浮输送，因此输送管道起始流速应大于被输送物料的悬浮速度。根据国内外有关试验研究资料和工程经验，负压气力输送系统起始端空气最低流速一般均推荐采用 10～12m/s，系统输送末速宜控制在 30m/s 以内。如果输送管道较长，为降低流速，需将管道分为几段，管径逐段放大。输送管道计算点实际空气流速 $v_a$ 可按式（2-5）核算。

（7）输送管道管径。输送管道管径可按式（2-6）核算。

3. 负压气力输送系统的输送出力计算

负压气力输送系统在一定的输送距离和输送浓度条件下，其输送出力主要取决于输送管径，其关系见表 2-29。

**表 2-29　负压系统出力与管径关系**

| 管径（mm） | DN100 | DN125 | DN150 | DN200 | DN250 |
|---|---|---|---|---|---|
| 系统出力（t/h） | 5 | 8～10 | 10～15 | 20～40 | 40～60 |

负压气力输送系统的输送出力还可根据能量守恒原理进行计算，系统将物料从输送管道始端输送至末端，该输送管段的出力可按式（2-9）计算。

4. 负压气力输送系统的压力损失计算

负压气力输送系统的压力损失由以下各部分组成：

（1）管道压力损失$\Delta p_L$。

1）与气锁阀系统相同，负压气力输送系统输送管道的压力损失可通过“稀相气力输送系统计算软件”进行计算。

2）负压气力输送系统输送管道的压力损失$\Delta p_L$（Pa）也可按式（2-45）进行计算

$$\Delta p_L = \left(p_b - \sqrt{{p_b}^2 - 19.6 p_b \lambda_a \frac{L_{eq}}{D} \times \frac{\rho_b {v_b}^2}{2g}}\right)(1 + k\mu) \tag{2-45}$$

$$p_b = p_a - \Delta p_c \tag{2-46}$$

式中　$p_b$——计算管段始端的绝对压力，Pa；
$p_a$——当地大气压，Pa；
$\Delta p_c$——受灰器的压力损失，Pa；
$\lambda_a$——空气的摩擦阻力系数；按式（2-21）计算；
$L_{eq}$——管道当量长度，m；按式（2-16）计算；
$D$——管道的内径，m；
$\rho_b$——管段始端的空气密度，kg/m³；
$v_b$——管段始端的流速，m/s；
$\mu$——输送混合比（灰气比），kg/kg；
$k$——两相流系数，可按表 2-12 所列数据选用。

（2）受灰器的压力损失$\Delta p_c$。受灰器的压力损失$\Delta p_c$应按制造厂家提供的数据选取；当没有厂家数据时，可按 2000～3000Pa 考虑，或按式（2-47）估算

$$\Delta p_c = (\lambda_c + 2.6\mu)\frac{\rho_a v_c^2}{2} \tag{2-47}$$

$$v_c = \frac{q_a}{60A} \tag{2-48}$$

式中　$\lambda_c$——受灰器的摩擦阻力系数，立式受灰器：$\lambda_c$=2～4，卧式受灰器：$\lambda_c$=1～2；
$\rho_a$——受灰器入口空气密度，kg/m³；
$v_c$——受灰器入口截面处的流速，m/s；
$q_a$——受灰器入口空气体积流量，m³/min；
$A$——受灰器入口管的截面积，m²。

（3）气灰分离设备的压力损失$\Delta p_r$。气灰分离设备的压力损失可根据选用的分离除尘设备形式，按制造厂家提供的压力损失数据选取，也可按表 2-30 选取。

**表 2-30　气灰分离设备的压力损失**

| 除尘器形式 | 旋风除尘器 | 布袋除尘器 | 泡沫除尘器 |
|---|---|---|---|
| 压力损失（Pa） | 1500～2000 | 1000～1500 | 700～1000 |

（4）消声装置压力损失$\Delta p_x$。当采用罗茨风机作为抽真空设备时，一般消声装置压力损失为 1000Pa。

（5）综上所述，可得负压气力输送系统的压力损失计算公式如下

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_c + \Delta p_r + \Delta p_x \tag{2-49}$$

5. 负压气力输送（稀相气力输送）系统计算软件

电力设计行业内开发的“稀相气力输送系统计算软件”，不仅包括气锁阀系统，也包括负压气力输送系统。

## 三、设备选型

负压气力输送系统的主要设备包括物料输送阀、气灰分离装置和抽真空设备。

1. 物料输送阀

物料输送阀又称受灰器，是负压气力输送系统的给料和发送设备，通常采用气动方式，在每个灰斗下均装设一套。受灰器一般有立式受灰器、CF 型受灰器和 E 型受灰器三种形式。

（1）立式受灰器。立式受灰器安装于灰斗下。干灰在重力作用下落入受灰器，在装置内与吸入的空气混合后，通过插入受灰器的吸嘴被吸入输送管道。在

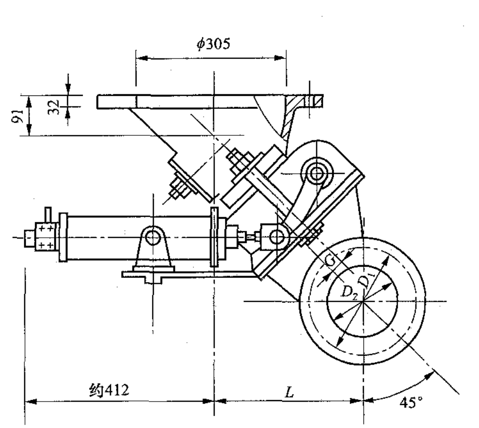
吸嘴的周围有一环形进风口，外部的空气由此进入，作为吸口处干灰扰动的气流和输送的介质。受灰器的出力主要与套筒出料管端部的间隙有关，安装后须根据系统出力要求进行调节。受灰器的侧部和底部分别开有一个检查孔，以备堵塞时清灰之用。立式受灰器由于其给料浓度低、输送效率低，不适用于输送能力较大、灰气比高的负压系统，目前已很少采用。

立式受灰器的主要技术参数见表2-31。

**表 2-31 立式受灰器的主要技术参数**

| 规格 | DN100 | DN125 | DN150 | DN200 | DN250 |
|---|---|---|---|---|---|
| 出力（t/h） | 2.5 | 3.6 | 5 | 10 | 15 |
| 质量（kg） | 56 | 78 | 113 | 165 | 200 |

（2）CF 型受灰器。CF 型受灰器又称为卸灰器，其外形结构见图 2-23。



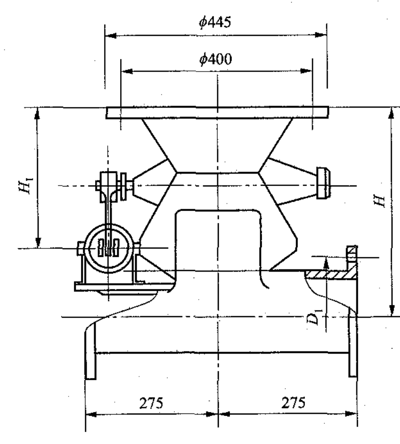




图 2-23 CF 型受灰器外形结构

CF 型受灰器本体不设进气口，进料口与出料口方向呈 45°。其喉部设气动翻板阀，当翻板阀打开以后，阀板上部的干灰在重力和负压抽力的作用下，从出料管流入输送管，与空气混合后输送。受灰器及出料管可以多个直接串联，并与输灰管连通。

CF 型受灰器有 CF-1 型与 CF-2 型两种型号可供选择，其外形参数见表 2-32。

**表 2-32 CF 型受灰器外形参数** （mm）

| 型号 | 喉部直径 | $D_2$ | $L$ | $H$ | $H_1$ | $G$ | $D_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CF-1 | 100 | 150 | 311 | 439 | 291 | 25 | 225 |
| CF-2 | 150 | 200 | 318 | 480 | 352 | 50 | 280 |

（3）E 型受灰器。E 型受灰器又称 E 型阀，是继立式受灰器之后用于负压系统的一种灰气混合给料装置。E 型受灰器本体有弹簧进气孔，进料口与出料口方向垂直，其出料采用气动单道滑板阀控制，当滑板阀打开后，阀板上部的干灰在自重和负压抽吸的作用下，与从进气孔吸入的空气混合后排至输灰管道。

E 型受灰器出料管必须通过输送支管串接在输灰管上，受灰器排出的气灰混合物再与输灰管始端吸入的空气混合后进行输送。当串接的任意一套受灰器发生故障时，可关闭灰斗出口关断阀，该受灰器退出运行。E 型受灰器出料管与输灰支管连接方式采用快速管接头。

E 型受灰器一般为卧式布置，其外形结构见图 2-24，主要由阀体、进气阀、滑动闸门和气缸组成。不锈钢滑动闸门由气缸控制其开关，气缸接有电磁阀及行程开关，可进行远距离控制。利用滑动闸门，可控制排入管道的灰量，也可与输送管道隔离。

受灰阀的主要技术参数见表 2-33。

**表 2-33 E 型受灰器主要技术参数**

| 参数 | 型号<br>WSF300×150（左）<br>WSF300×150（右） |
|---|---|
| 输送物料 | 干灰或粉状物料 |
| 工作压力（MPa） | 0~-0.09 |
| 物料温度（℃） | <150 |
| 出料口口径（mm） | 150 |
| 进料口口径（mm） | 300 |
| 控制气源压力（MPa） | 0.4~0.6 |
| 质量（kg） | 106 |

2. 气灰分离装置

负压气力输送系统气灰分离装置常见的有两种形式：一种是旋风分离器＋布袋除尘器二级串联；另一种是组合式过滤除尘器。

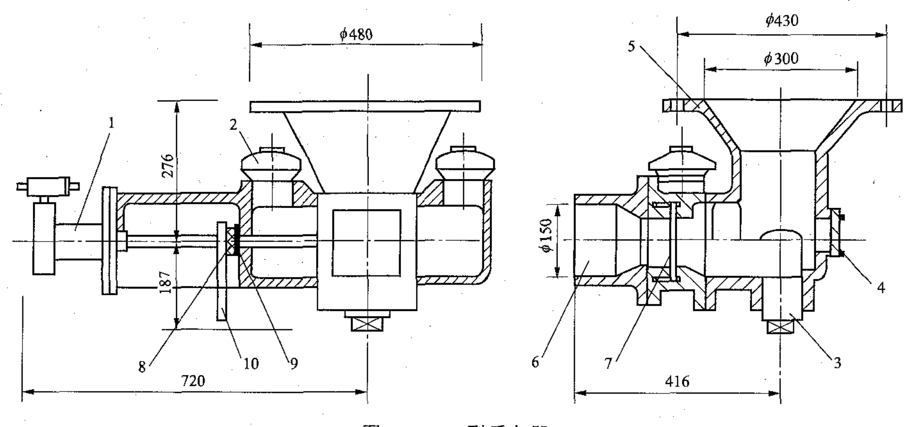



图 2-24　E 型受灰器

1—带阀气缸；2—进风调节阀；3—方头堵塞；4—尾盖；5—受料斗；6—出料管；7—闸板；8—填料盖；9—填料座；10—手柄

（1）旋风分离器+布袋除尘器二级串联。该类型除尘装置的第一级采用旋风除尘器，结构简单，本体压力损失小，适合于负压气力输送系统的一级除尘。

负压气力输送系统的旋风除尘器常用的有两种，其外形结构见图 2-25 和图 2-26。气灰混合物从入口沿切线方向进入旋风除尘器，在筒体内做旋转运动。由于离心力的作用，越靠筒壁压力越高，悬浮在空气中的灰粒在离心力的作用下，碰撞到筒壁，从空气中分离出来。粒径较细的灰粒，随气流沿筒壁一边做旋转运动，一边下降。由于到达圆锥部后，旋转半径减小，旋转速度逐渐增加，使气流中的灰粒受到更大的离心力，进一步使细灰粒从旋转气流中分离出来。当气流到达锥体的下部就开始反转，在筒体的中心逐渐旋转上升，然后从出口排出。

排气管口，根据现场要求切割
上储灰室
中间灰室
下灰室（接灰室）

图 2-25　B60 旋风除尘器

1—防磨衬板；2—顶盖；3—进气口；4—排气口；5—筒体；6—上卸灰门；7—汽缸；8—下卸灰门；9—上平衡阀；10—下平衡阀；11—检修门

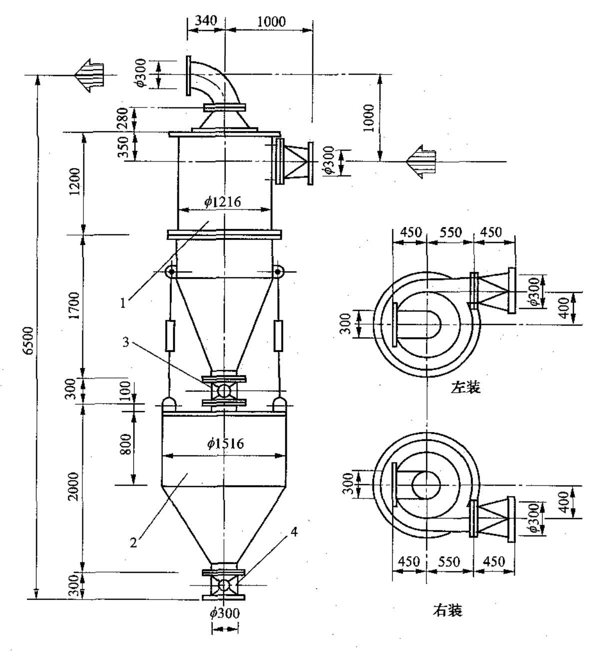



图 2-26　φ1200 旋风除尘器

1—旋风除尘器本体；2—中间灰斗；3—气动进料阀；4—气动出料阀

在旋风除尘器筒体的中部，气流的旋转速度与筒体的半径大致成正比，称为强制涡流区。在筒体的外周部，由于筒壁的摩擦和气流本身的黏性，旋转速度的分布接近二次曲线，越接近外侧速度越小，称为准自由涡流区。在两个区的交界处，具有最大的旋转速

度，其位置一般约在出口管径的60%处。

旋风除尘器的分离效率及压力损失，均与内外筒的直径、筒长和入口面积有关。试验研究表明，当内外筒直径比 $D/d$=2～3 时，除尘器的分离效率最高。

旋风除尘器的直径，可按除尘器内气流速度不大于 0.24m/s 进行选取。旋风除尘器的进口气流速度不宜大于32m/s，出口气流速度不宜大于24m/s，其除尘效率可取 70%～85%，压力损失为 500～2000Pa。在除尘器下料管处应装设双级翻板式锁气器或电动锁气器，将分离后的干灰卸入灰斗或灰库。目前，负压气力输送系统的第一级除尘设备一般均采用典型的 $\phi$2600 即 B60 旋风分离器。

负压气力输送系统串联式分离装置的第二级一般采用布袋除尘器，其功能是将含尘的气流通过滤袋而将 0.1μm 左右的粉尘加以捕集，收尘效率高，通常布袋除尘器的除尘效率能达到 99.9%以上。在除尘器的壳体内装有许多直径为 100～300mm 的筒状滤袋，为保持滤袋的形状，每个滤袋均设有支撑骨架。含尘气流由下部进入，当气流经过滤袋时，粉尘被捕集，过滤净化后的气流从出口排至负压风机。为了不使捕集的灰黏附在滤袋上，一般均设置振打或吹扫滤袋的装置，每隔一定时间振动滤袋，将黏附在滤布面上的粉尘振落并排入灰库内。滤袋的过滤作用不是靠滤布，而是靠粉尘的一次黏附层。换言之，滤布仅起网格的作用，最初黏附在网格上的粉尘层才是起捕集灰尘的作用。因此，布袋除尘器可过滤和捕集比滤布孔眼还小的灰粒。

布袋除尘器的选型，一般可根据系统设计所需处理的气体流量、气体中的含尘浓度及净化的要求等，按照制造厂家提供的产品性能资料选择合适的型号，同时壳体构架的强度应能满足负压气力输送系统运行的要求。布袋除尘器的过滤风速一般按不大于 0.8m/min 选取。

根据振落滤袋积灰的方式不同，常用的布袋除尘器有机械振打和脉冲反吹式两种形式。脉冲反吹式布袋除尘器的结构见图 2-27。

（2）组合式过滤除尘器。组合式过滤除尘器是用一个箱体兼具旋风和布袋除尘器的功能。

组合式过滤除尘器结构见图 2-28，其具有二级除尘作用，滤袋下方装有一根水平放置的盲管，一端连接输灰管道，引入含尘空气，另一端封闭，中间下方开有一个矩形开口，当含尘空气进入盲管冲到盲端反弹回来与进来的灰气相撞，使灰粒子在撞击下互相黏附形成大粒子，在重力的作用下从气灰混合物中分离下来落入真空隔离用气锁阀，并排入灰库，这相当于一级除尘；含细颗粒的灰气从矩形口出来向上流过布袋，通过布袋的过滤作用将细颗粒过滤下来吸附在滤袋上，在脉冲反吹压缩空气的振打下靠重力落入布袋除尘器下的隔离用气锁阀中再排入灰库，而净化后的空气则从布袋除尘器的顶部排出经过负压风机排入大气。

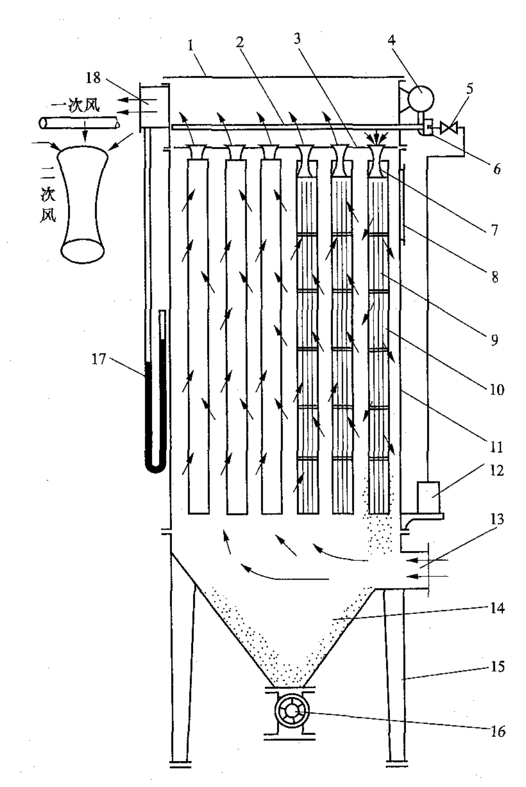



图 2-27　脉冲反吹式布袋除尘器的结构图

1—排气箱；2—喷吹管；3—花板；4—压缩空气包；5—压缩空气控制阀；6—脉冲阀；7—喇叭管；8—备用进气口；9—滤袋支撑骨架；10—滤袋；11—除尘箱；12—脉冲信号发生器；13—进风管；14—灰斗；15—机架；16—电动锁气器；17—U 形衡压计；18—净化气出口管

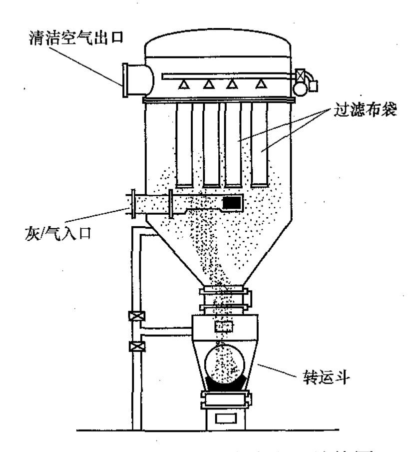



图 2-28　组合式过滤除尘器结构图

3. 抽真空设备

负压气力输送系统抽真空设备一般采用负压罗茨风机或水环式真空泵，其结构和选型参见本书第五章。

## 四、系统图

典型的负压气力输送系统图见图 2-29。

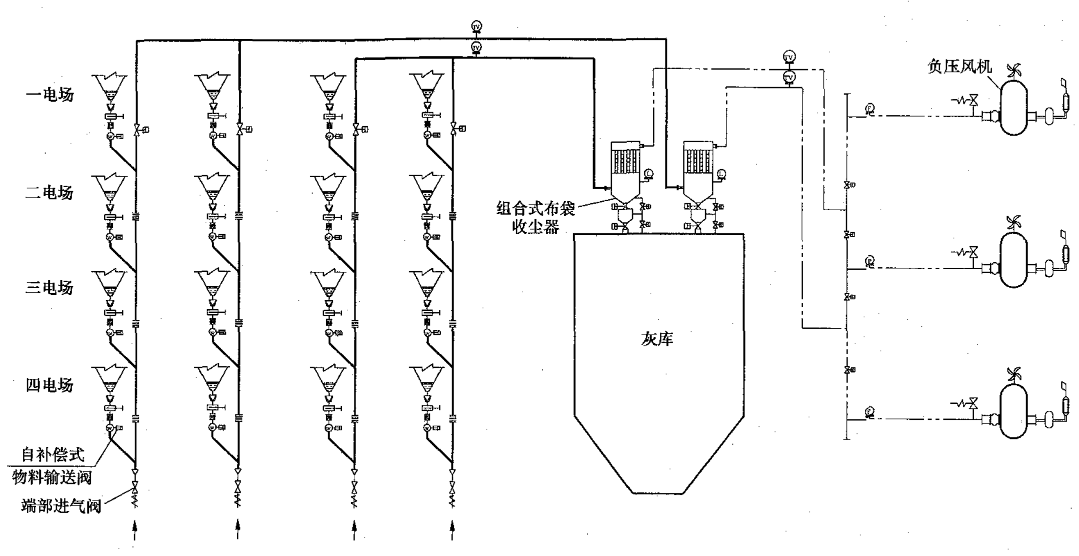



图 2-29　负压气力输送系统图

## 五、计算举例

以下举例说明负压气力输送系统的计算，供工程项目设计时参考。

某工程 1×300MW 机组四电场电除尘器的飞灰采用负压气力输送，系统设一根输送母管，采用旋风分离器+布袋除尘器二级除尘。以下对该输送系统进行计算。

1. 计算原始资料（一台炉）

（1）输送物料：普通煤粉炉电除尘器飞灰，堆积密度为 0.7t/m$^3$。

（2）设计灰量：$G_h$=20t/h；灰温：120℃。

（3）灰斗数：每电场 4 个，共 16 个。

（4）输送距离（按最远一个灰斗）：水平距离为 150m，爬高 20m，90°标准弯头数为 7 个，非标准弯头数为 0。

（5）当地气象条件：平均气温 $t_a$ 为 20℃；大气压 $p_a$ 为 95000Pa。

2. 系统出力 $G$

系统出力按式（2-44）计算

$$G=200\%\times 20=40\ (t/h)$$

3. 输送管道距离参数

管道几何长度 $L$=150m；垂直升高 $H$=20m；90°标准弯头 $N$=9。

4. 输送灰气比$\mu$

由于该工程输送距离适中，按经验选取，暂定 $\mu$=18kg/kg。

5. 输送系统所需的空气量（标准状态下）

输送空气量按式（2-3）计算

$$q_0=12.89\times 40/18=28.64\ (m^3/min)$$

6. 输送速度

输送初速暂定为 $v_b$=12m/s。

7. 输送管道管径

输送管道暂按分为 2 段考虑，根据系统设计出力 40t/h，查表 2-29，可将第一段管径暂定为 250mm，第二段管径应适当放大，暂定为 300mm。

8. 软件计算

（1）程序输入数据。初速：12m/s；当地气温：20℃；当地大气压：0.95kgf/cm$^2$（93163Pa）；管道段数为：2；各段数据见表 2-34。

表 2-34　　管道输入数据

| 输入参数 | 1 段 | 2 段 |
|---|---|---|
| 垂直升高（m） | 5 | 15 |
| 水平长度（m） | 70 | 80 |
| 管道内径（mm） | 250 | 300 |
| 标准弯头数 | 3 | 4 |
| 假设压降（mm$H_2O$）① | 2000 | 2000 |

① 1mm$H_2O$=9.80665Pa。

（2）软件计算结果。软件计算结果见表 2-35。

表 2-35　软件计算结果

| 输入参数 | 计算结果 |
|---|---|
| 管段：1 段 | |
| 出力（t/h） | 40.59 |
| 初速（m/s） | 12 |
| 末速（m/s） | 15.15 |
| 调整后压降（$mmH_2O$） | 2318 |
| 管段：2 段 | |
| 出力（t/h） | 40.60 |
| 初速（m/s） | 10.52 |
| 末速（m/s） | 13.14 |
| 调整后压降（$mmH_2O$）① | 1680 |
| 风机入口风量（$m^3/min$） | 55.71 |
| 标准状态风量（$m^3/min$） | 32.61 |
| 灰气比 | 17.28 |

① $1mmH_2O=9.80665Pa$。

由计算结果可知，2 段输送管道的设计出力、流速等参数均满足要求，计算结果正确，得出了负压风机的设计风量和输送管段的压力损失，输送管道按 $\phi273\times7$ 和 $\phi325\times7$ 两段配置。

9. 负压系统总的压力损失 $\Delta p$

按式（2-49）　$\Delta p=\Delta p_L+\Delta p_c+\Delta p_{ac}+\Delta p_r+\Delta p_x$

按表 2-30（旋风、布袋二级除尘）$\Delta p_r=1500+1500=3000$（Pa）

按表 2-35（2 段输送管道）　$\Delta p_L=2318+1680=3998$（$mmH_2O$）$=39980$（Pa）

因此　$\Delta p=39980+2000+0+3000+1000$

$=45980$（Pa）$=4598$（$mmH_2O$）

10. 确定负压风机的设计参数

根据以上计算结果，负压风机的入口计算风量（真空）为 $55.71m^3/min$，系统总压力损失为 $4598mmH_2O$，分别考虑 1.1 和 1.2 的富裕系数，可得出风机的设计参数。负压风机的选型规定详见本书第五章第三节。

## 第四节　空气斜槽及气力提升泵系统

### 一、空气斜槽

空气斜槽是一种箱体结构装置，顶层为物料输送室，底层为空气室，期间的隔层用纤维织物材料制成，流化空气由装置的底部小室通过纤维织物隔层均匀渗透入料层中，使物料流态化后沿着槽体的坡向流动。它是一种经济实用的短距离气力输送设备，其槽身倾斜度不小于 6%，输送距离一般不大于 60m，用于输送飞灰、水泥和其他易流态化的粉状物料，而对粒度大、水分多和流动性差的物料则不适用。系统所需的输送风一般由专用的鼓风机或锅炉送风机供给。

空气斜槽系统可用于单个排料点的物料转运，也可用于多个排料点的物料集中和输送。系统一般由空气斜槽、鼓风机及供气管道、进料管及锁气给料机、排气管道等组成。

1. 设计要求

系统及布置的设计原则和要求如下：

（1）空气斜槽系统一般采用连续输送，斜槽的出力等于其进口给料设备的总出力。

（2）空气斜槽的单位耗气量或总风压应分别经过试验确定。无试验数据时，单位面积耗气量可按 1.5～2.5$m^3/(min\cdot m^2)$（透气层，标准状态下）选取；总风压可按 3～5kPa 选取。

（3）空气斜槽的输送气源应采用清洁的热风，热风温度宜按 40～80℃选取。风源宜由专用风机供给，风机可不设备用。

（4）空气斜槽的起点处应设置一个进风点，转向处和每隔 30m 处宜各设一个进风点和气室隔板。

（5）空气斜槽的布置和安装斜度不小于 6%。

（6）排灰斗与空气斜槽进料口之间应装设隔离检修阀和电动锁气器。

（7）空气斜槽宜考虑采用防潮保温措施。

（8）落灰管与空气斜槽之间及鼓风机与风嘴之间宜用柔性连接；鼓风机到斜槽的进气管越短越好。

（9）空气斜槽的排气宜接至锅炉除尘器入口烟道，其间应装设关断阀；排气管应有一定斜度，避免积灰。

2. 设计计算

（1）空气斜槽的输送出力。空气斜槽的输送出力 $G$（t/h）可按式（2-50）计算

$$G=3600K_x b\delta v_x\rho_f \tag{2-50}$$

式中　$b$——空气斜槽宽度，m；

$\delta$——灰层厚度，可取 0.10～0.15m；

$K_x$——系数，可取 0.9；

$v_x$——灰在空气斜槽中输送速度，m/s；

$\rho_f$——流动状态时灰的密度，应由试验取得，当无试验资料时，按式（2-51）计算

$$\rho_f=0.75\rho_d \tag{2-51}$$

式中　$\rho_d$——灰的堆积密度，$t/m^3$。

（2）空气斜槽内物料的输送速度。物料在流态化状态下输送可看作是自流沟内无压力的流动液体，因

此，计算水力输送设备所遵循的理论均适用于空气输送斜槽的参数。

空气斜槽内灰的输送速度 $v_x$（m/s）可按式（2-52）计算

$$v_x=38.5R_n^{2/3}i^{1/2} \tag{2-52}$$

$$R_n=\frac{b\delta}{2\delta+b} \tag{2-53}$$

式中 $i$——空气斜槽的斜度，%；

$R_n$——水力半径，m。

（3）空气斜槽的耗气量。单位耗气量是空气斜槽的一个重要参数，通过大量试验表明，当空气斜槽的单位面积耗气量 $q_j$=1.5～2.5m³/（min·m²）时最为经济有效。

空气斜槽的耗气量 $q$（m³/h）可按式（2-54）计算

$$q=60q_jbL \tag{2-54}$$

式中 $q_j$——单位面积耗气量，m³/（min·m²），一般在1.5～2.5m³/（min·m²）范围内，与透气层的材质有关，须通过试验选取，如无资料，多孔板 $q_j$=1.5，三层帆布、毛毡 $q_j$=2.0；

$b$——斜槽宽度，m；

$L$——斜槽长度，m。

（4）空气斜槽的空气压力 $p_j$。空气斜槽输送风机所需的压力 $p_j$ 应大于斜槽透气层的阻力、物料层的阻力及供气管路系统阻力之和 $\Delta p$，即 $p_j>\Delta p$

$$\Delta p=\Delta p_\delta+\Delta p_h+\Delta p_a \tag{2-55}$$

$$\Delta p_h=9.8\rho_s\delta \tag{2-56}$$

式中 $\Delta p_\delta$——透气层阻力，kPa，与透气层的材质有关，并与通过透气层的空气量成正比，根据试验资料，在一定的单位面积耗气量时，各种材质透气层的阻力：多孔板 $\Delta p_\delta$=2.0kPa，毛毡 $\Delta p_\delta$=1.50～1.70kPa，纺织品 $\Delta p_\delta$=1.0kPa；

$\Delta p_a$——供气管路系统的阻力，kPa；

$\Delta p_h$——物料层的阻力，kPa；

$\delta$——物料层高度，m；

$\rho_s$——物料堆积密度，t/m³。

空气斜槽的输送空气压力一般为 3.50～6.0kPa。透气层选用纺织品时，可选用较低值。透气层选用多孔板或大规格、长斜槽时，可选取较高值。风源宜由专用风机供给，专用风机可不设备用。

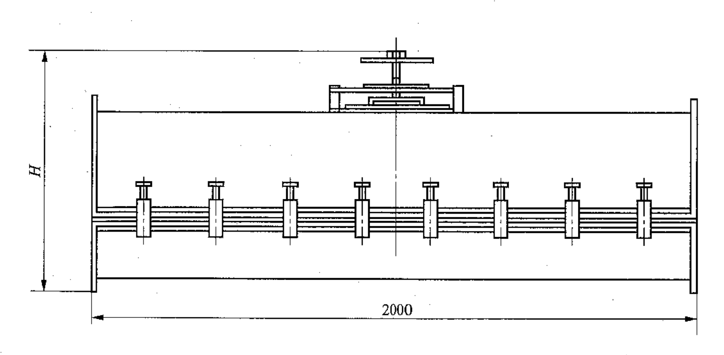
输送气源应采用热风，热风温度宜为40～80℃。

3. 设备选型

空气斜槽系统的设备包括空气斜槽和鼓风机。

（1）空气斜槽。空气斜槽的长度、倾斜度，以及进、出料管等部件的组成和数量等是根据工程的输送条件进行设计的，但其输送槽体部分的结构是相同的。

1）输送槽体的结构。槽体由上槽和下槽组成，中间用透气层隔开。槽体沿着输送方向安装成向下倾斜 6%的斜度，槽体用厚 2～4mm 的钢板制造。其结构见图 2-30。



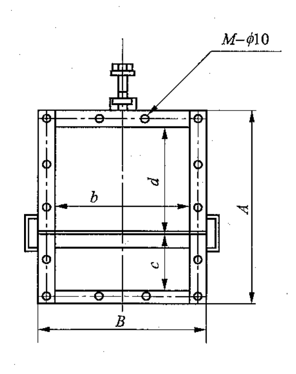




图 2-30 标准斜槽外形结构图

2）空气斜槽的部件和组成。空气斜槽主要包括以下部件，可根据不同的输送条件进行组合。

a. 标准槽和非标准槽。标准槽为空气输送斜槽的主要构成部分，其单节长度为 2m；非标准槽用于满足斜槽布置尺寸中不足 2m 的部分。其长度一般按 250mm 的倍数选取。

b. 90°弯槽。用于输送斜槽的转向，分左、右向两种。

c. 三通槽和四通槽。三通槽用于输送斜槽的改向或分流、汇流用；四通槽用于分流或汇流，分一进三出和三进一出两种。

d. 截气闸门。在斜槽一段运行、一段停运时，将截气闸门关闭，以保证斜槽运行部分的用气，并减少风机的供气量。

e. 槽架。用于支承斜槽，槽架间距一般为 4m 左右，设置时应错开槽体法兰一定距离，以免影响槽体伸缩。

f. 端盖板和出料管。端盖板用于斜槽起始端的盖板；出料管用于卸料处。

g. 进料溜板。装在斜槽进料口的下面，起缓冲板

的作用，用以减少进料时对透气层的磨损。

h. 透气层。用来承托输送物料，同时使输送空气均匀地透过透气层将物料充分流化。透气层的材质是多种多样的，目前电力行业常用的是多层帆布。

i. 排气管。斜槽的排气风量一般按所需风量的1.5倍考虑。在正常运行中，上槽的压力要求保持在零或微负压。

3）空气斜槽的主要技术数据。空气斜槽主要技术选型数据见表2-36。

（2）鼓风机。空气斜槽专用的鼓风机为高压离心风机，一般每台斜槽设置一台风机，不设备用。离心风机的风量和风压应根据斜槽系统计算后确定，一般斜槽系统离心风机的风量为 500～5000m³/h；风压为4.0～6.5kPa。

**表 2-36　空气斜槽主要技术数据**

| 空气斜槽宽度 $B$（mm） | | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 出力（m³/h） | 斜度 6% | 20 | 30 | 60 | 120 | 200 |
| | 斜度 8% | 30 | 45 | 90 | 180 | 300 |
| | 斜度 10% | 45 | 65 | 135 | 240 | 450 |
| 风压（kPa） | | 3.5～6 | | | | |
| 风量［m³/（min·m²）］ | | 1.5～2.5 | | | | |

根据工程实际统计，一般斜槽专用的鼓风机采用通用的9-19型高压离心通风机。

4. 系统图

除尘器下空气斜槽输送典型的系统图见图2-31。

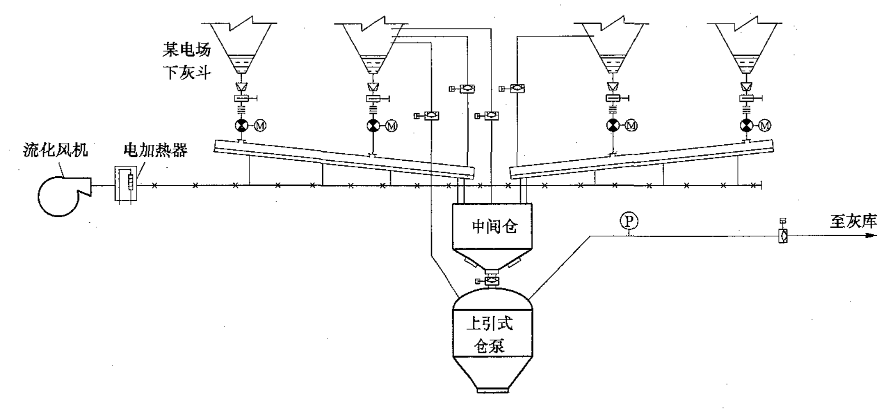



图 2-31　除尘器下空气斜槽输送典型的系统图

## 二、气力提升泵

气力提升泵是用于垂直气力输送粉状物料的设备，主要由输送泵体、输送管道（含入库管道或膨胀仓）及气源三部分组成，在泵的下面装有输送喷嘴，能在大气压下进行气粉混合，而混合物通过管道输送至上部膨胀仓后，气粉的速度突然降低，使得气粉分离，分离后的粉体再被其他设备输送，如粉仓（或利用高差溜入粉仓），气体则通过除尘设备后排入大气。该装置系统输送能力较大且提升高度较高，其连续输送出力可达200t/h，提升高度可达60m以上。输送空气一般由罗茨风机提供。

1. 设计要求

系统及布置的设计原则和要求如下：

（1）气力提升泵系统主要用于飞灰、水泥等粉状物料的垂直提升，其设计提升高度不宜超过100m。

（2）气力提升泵系统采用连续输送，提升泵的出力等于供给它物料的输送设备出力。

（3）气力提升泵输送系统设计和计算时，一般输送料气比按7～20kg/kg考虑。

（4）气力提升泵的输送气源应采用清洁的热风，热风温度宜按 40～80℃选取。风源宜由罗茨风机供给，风机宜设备用。

（5）气力提升泵宜紧邻料仓或灰库布置，其垂直输送管的支架生根于料仓外壁。

（6）气力提升泵布置于上一级输送设备或中间料仓的排料口下，每个排料口宜布置一台气力提升泵。提升泵的进料管上可不设置气锁阀。

（7）气力提升泵分为卧式和立式两种。当布置高度允许时，可采用立式布置；当高度紧张时，可采用卧式布置。卧式泵的输送管自出泵后设有一段水平管段，然后通过弯管至垂直提升管。

（8）垂直提升管的末端，一般设置90°耐磨弯头，直接卸料至料仓。如果采用膨胀仓卸料，其顶部应设排气除尘器，膨胀仓的支架一般生根于料仓壁。

（9）气力提升泵的排气宜接至料仓顶部或锅炉除尘器入口烟道，其间应装设关断阀；排气管应有一定斜度，避免积灰。

（10）输送罗茨风机应尽量靠近气力提升泵布置。

2. 设计计算

（1）气力提升泵的输送出力 $G$。气力提升泵为连续输送装置，其输送出力 $G$ 应等于其上游给料设备的出力。

（2）输送混合比 $\mu$。混合比与许多因素有关，它随着提升高度的增加而下降，随着泵体内粉体层高度增加而提高；此外，与物料特性、输送流速、喷嘴直径和流速、喉嘴距离、二次风量、输送物料理化性能、工艺布置、设备结构等因素有关。一般水泥和飞灰的输送混合比采用 $\mu$=7～20kg/kg。

（3）输送风机风量 $q_m$。当气力提升泵的输送能力 $G$(t/h)和混合比 $\mu$ 确定后，就可按式(2-57)和式(2-58)计算输送空气量 $q_V$（$m^3$/min）和输送风机风量 $q_m$（$m^3$/min），即

$$q_V=\frac{1000\times(G/\mu)}{60\rho_a}=16.67\frac{G}{\rho_a\mu} \tag{2-57}$$

$$q_m=\phi q_V \tag{2-58}$$

式中 $\phi$——漏风系数，可取 1.1～1.2；

$\rho_a$——当地自由空气密度，$kg/m^3$。

（4）风机压力。风机全压取决于系统总的压力损失，包括输送管道压损、喷嘴压损、加速物料时的压损、供气管道压损等，主要压损为前两项，并考虑风压裕量（取 1.15～1.20）确定风机压力。

为降低气力提升泵的输送能耗，风机压力不宜太高，一般可根据提升高度的不同，按 35～60kPa 选取，当提升高度在 30m 以内时，可按 35kPa 选取。

（5）输送流速 $v$ 与输料管直径 $D$。输送流速 $v$（m/s）可按式（2-59）估算，飞灰或水泥也可按经验数据 16～25m/s 选取。输送管直径 $D$（m）按式（2-60）计算，即

$$v=(10\sim16)\sqrt{\frac{\rho_d}{1000}} \tag{2-59}$$

$$D=\sqrt{\frac{4q_V}{60\pi v}} \tag{2-60}$$

式中 $\rho_d$——物料密度，$kg/m^3$；

$q_V$——输送空气量，$m^3$/min。

3. 设备选型

气力提升泵系统的设备包括气力提升泵和输送风机。

（1）气力提升泵。气力提升泵分为立式和卧式两种，输送喷嘴垂直布置时为立式；水平布置时为卧式（平吹式）。立式气力提升泵结构见图 2-32，提升泵本体包括圆筒状的输送罐体和气化室，中间隔有多孔透气板。输送罐体留有进料、出料和排气接口，气化室留有输送风和气化风接口。

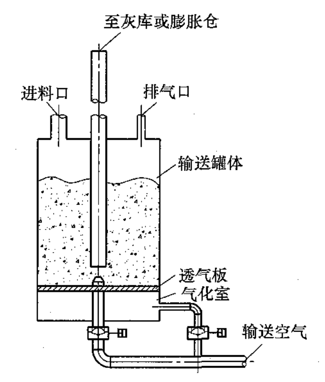



图 2-32　立式气力提升泵结构示意图

常用气力提升泵的主要技术参数见表 2-37。

表 2-37　常用气力提升泵的主要技术数据

| 型号规格 | DN800 | DN1000 | DN1250 | DN1400 | DN1600 |
|---|---|---|---|---|---|
| 泵体内径（mm） | 800 | 1000 | 1250 | 1400 | 1600 |
| 进料管管径（mm） | 219 | 273 | 325 | 325 | 377 |
| 出料管管径（mm） | 159 | 219 | 325 | 325 | 377 |
| 输送物料 | 水泥、飞灰 | 水泥、飞灰 | 水泥、飞灰 | 水泥、飞灰 | 水泥、飞灰 |
| 物料温度（℃） | ＜120 | ＜120 | ＜120 | ＜120 | ＜120 |
| 物料含水率（%） | ＜1 | ＜1 | ＜1 | ＜1 | ＜1 |
| 最大出力（t/h） | 22 | 50 | 80 | 85 | 125～170 |
| 最大提升高度（m） | 100 | 100 | 100 | 65 | 65 |
| 风机风量（$m^3$/min） | 约 20 | 约 45 | 约 100 | 约 80 | 140～200 |
| 风机压力（kPa） | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 设备总高（mm） | 6000 | 6500 | 8900 | 8700 | 9150 |
| 设备总质量（kg） | 1500 | 2000 | 2600 | 3500 | 3930 |

（2）输送风机。气力提升泵的输送风机提供输送和流化空气，一般采用罗茨风机，风机压力一般为35～60kPa。罗茨风机的选型详见本书第五章第三节。

4. 系统图

典型的气力提升泵输送系统图见图2-33。

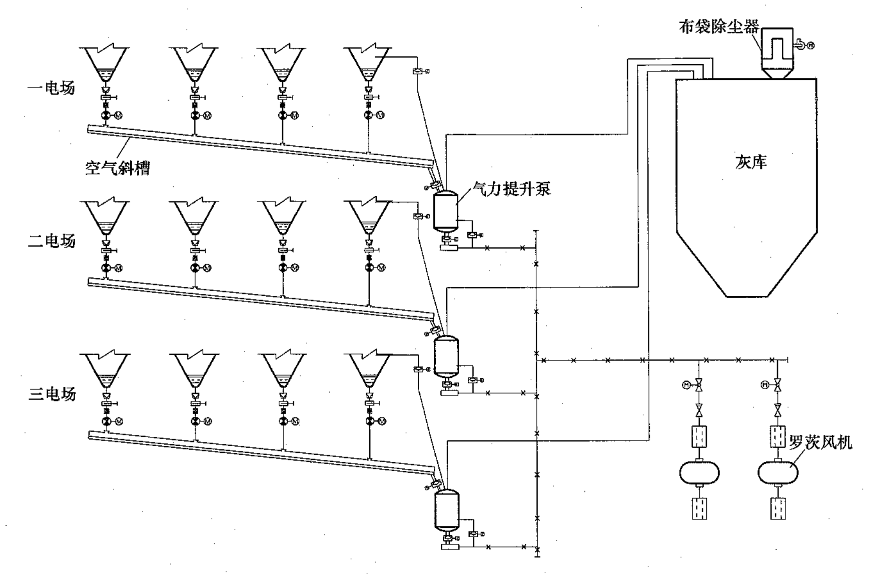



图2-33 典型的气力提升泵输送系统图

## 第五节 粉煤灰分选系统

### 一、概述

1. 飞灰等级

火力发电厂粉煤灰应优先考虑综合利用，对于掺入水泥的飞灰，必须达到规定的细度及其他特殊标准，即等级灰（Ⅰ级灰和Ⅱ级灰）的要求。GB 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》中对Ⅰ、Ⅱ级灰的分级和质量标准见表2-38。

表2-38 Ⅰ、Ⅱ级粉煤灰的分级和质量标准

| 序号 | 指标 | 级别 | |
|---|---|---|---|
| | | Ⅰ | Ⅱ |
| 1 | 细度（0.045mm方孔筛筛余量%） | <12 | <25 |
| 2 | 需水量比（%） | <95 | <105 |
| 3 | 烧失量（%） | <5 | <8 |
| 4 | 含水量（%） | <1 | <1 |
| 5 | 三氧化硫（%） | <3 | <3 |

2. 系统简介

电厂排出的原状粉煤灰有粗有细、粒径分布较广，一般中位粒径（50%筛余）为0.05mm以上，不满足Ⅰ、Ⅱ级灰的细度要求。气力分选系统就是利用高压离心风机作为动力源，在管道内产生高速气流，粉煤灰随气流输送至分级机和旋风分离器，把原灰分离为粗灰和Ⅰ、Ⅱ级细灰的装置。

分选系统一般采用闭式，由给料装置、输送管道、分级机、旋风分离器、离心风机和控制系统等组成；系统主要分为蜗壳式分选系统（分级机采用蜗壳式）和蜗轮式分选系统（分级机采用蜗轮式）两种，其主要区别是采用了不同形式的分级机。

蜗壳式分级机采用传统的惯性离心分离原理，其适应的气灰混合物浓度即灰气比较低，因此出力受限，一般该系统的原灰出力范围为5～60t/h。蜗轮式分级机采用机械强制分离，其适应的气灰混合物浓度即灰气比相对较高，因此出力较大，一般该系统的原灰出力范围为5～100t/h，最大可达200t/h。

### 二、设计要求

系统及布置的设计原则和要求如下：

（1）分选系统宜采用纯悬浮流的气力输送、闭式分选循环系统。设计出力不大于60t/h时，可采用蜗壳式分选系统或蜗轮式分选系统；设计出力大于60t/h时，宜采用蜗轮式分选系统。

（2）原状灰卸出进入分选系统的卸料管道上应设手动隔离阀和调速型锁气给料机。

（3）原状灰进入分选系统应先经过特制的气灰混合器。

（4）采用蜗壳式气流分级机的分选系统输送灰气

比宜为 0.7～1.2kg/kg；采用蜗轮式气流分级机的分选系统输送灰气比宜为 0.9～3.0kg/kg。

（5）干灰分选系统管道内的输送速度宜取 15～30m/s，其中输灰管流速可取低值，回风管流速可取高值。输送管道的直管段可采用碳钢管，弯头材质应采用耐磨材料。输灰管道的壁厚不宜小于 8mm，回风管道的壁厚不宜小于 6mm。

（6）分选系统的分级效率不小于 80%，收尘效率不小于 90%。

（7）系统分选出的细灰收集宜采用旋风分离器。

（8）分级机及旋风分离器在卸料处宜采用锁气卸料阀卸料。

（9）粉煤灰分选系统应采用专用的耐磨型离心风机，分级机、旋风收尘器及高压离心风机的通流部件应采用耐磨材质。

（10）闭式分选系统布置于灰库区域，分选灰库一般与电厂灰库储存系统共用；至少设有一座原灰库、一座粗灰库和一座成品细灰库。

（11）耐磨离心风机布置于灰库区域 0m，宜尽量靠近细灰库。

（12）系统进料用的调速电动给料机布置于原灰库卸灰口下。

（13）气流分级机（蜗壳或蜗轮）布置于粗灰库库顶，其进气口应朝向原灰库方向，排气口朝向分选灰细灰库方向。

（14）旋风分离器位于分选灰细灰库库顶，从分级机出来的含尘气流分两路从分离器侧面的进气口进入分离器。

（15）输灰管和回风管的布置应尽量短直、弯头少，耐磨弯头的转弯半径宜不小于管道直径的 3 倍。

（16）分选系统的设备和管道布置要与灰库区设施协调统一，并满足安装、运行检修的要求。

## 三、设计计算

对于闭式分选系统，蜗壳式和蜗轮式输送原理是基本相同的，都是稀相输送；但其分级机的分选原理不同，输灰管中的灰气比也不同。因此，两种系统的计算方法是相同的，每套分选系统的选型计算如下：

1. 计算原始资料

（1）原灰量。

（2）灰的物理性能，包括粒径、堆积密度、真实密度等。

（3）工程当地气象条件，包括平均气压、平均气温等。

（4）输送条件，包括输灰管水平长度、回风管水平长度、高差和弯头数量等。

2. 系统设计参数计算

（1）系统出力 $G$。可根据项目的设计原灰量确定分选系统套数，再确定每套系统的出力 $G$。

（2）输送灰气比 $\mu$。根据物料物料特性试验及工程经验确定一个合理的灰气比。一般对于蜗壳式系统，$\mu$ 可取 1 左右；对于蜗轮式系统，$\mu$ 可取 3 左右。

（3）系统风量计算。系统的设计风量 $q_V$（m³/h）可按式（2-61）进行计算

$$q_V = \frac{1000G}{\mu \rho_a} \tag{2-61}$$

式中 $G$——系统出力，t/h（根据原灰量和系统套数确定）；

$\mu$——分选灰气比；

$\rho_a$——当地自由空气密度，kg/m³。

（4）选取输送平均风速 $v$。分选系统确定输送风速的原则：输灰管（从进灰点起至旋风分离器排气口）的气灰混合物流速应满足分级设备的设计风速；回风管的空气流速可以略高。

对于蜗壳式系统，输灰管的气体流速一般取 20～25m/s；回风管的流速一般取 20～30m/s 为宜。

对于蜗轮式系统，输灰管的流速一般取 15～20m/s；回风管的流速一般取 20～30m/s 为宜。

（5）计算输送管径 $D$

$$D = \sqrt{\frac{4q_V}{\pi v}} \tag{2-62}$$

式中 $q_V$——系统的设计风量，m³/s；

$v$——平均流速，m/s。

（6）计算系统输送管道的当量长度。按式（2-16），并参照表 2-7 和表 2-8 的规定，分别计算输灰管道的当量长度 $L_{eq1}$ 和回风管的当量长度 $L_{eq2}$。

（7）计算输送管道的压力损失 $\Delta p_L$。

1）输送管道的纯空气阻力 $\Delta p_a$ 计算。输送管道（输灰管和回风管）的纯空气阻力 $\Delta p_a$（Pa）按式（2-63）计算，如果输灰管和回风管的管径和流速不相同，应分别计算后相加，即

$$\Delta p_a = \zeta \frac{1}{2} \rho_a v_a^2 + \lambda_a \frac{1}{2} \times \frac{L_{eq}}{D} \rho_a v_a^2 \tag{2-63}$$

式中 $\zeta$——局部阻力系数，一般系统设一个蝶阀，开度为 80%，$\zeta$ 取 0.85；

$v_a$——输送管道内的平均气体流速，m/s；

$\rho_a$——当地自由空气密度，kg/m³；

$\lambda_a$——空气与管道内壁的摩擦阻力系数，无缝钢管取 0.03；

$L_{eq}$——输送管段的当量长度，m；

$D$——输送管段的内径，m。

2）输灰管道的灰粒附加阻力 $\Delta p_s$ 计算。输灰管道

的灰粒附加阻力$\Delta p_s$（Pa）按式（2-64）计算

$$\Delta p_s = \lambda_s \frac{L_{eq1}}{D} \times \frac{1}{2} \rho_a \frac{v_s}{v_a} v_a^2 \tag{2-64}$$

$$\lambda_s = \frac{0.805}{Fr^{1.883}} \tag{2-65}$$

$$Fr = \frac{v_s}{\sqrt{gD}} \tag{2-66}$$

式中 $\lambda_s$——颗粒附加阻力系数；

$L_{eq1}$——输灰管段的当量长度，m；

$v_s$——粒子速度，一般取 $v_s$=0.95$v_a$；

$Fr$——弗劳德数。

3）输送管道的压力损失$\Delta p_L$

$$\Delta p_L = \Delta p_a + \Delta p_s \tag{2-67}$$

（8）分选系统的总压力损失$\Delta p$

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_m + \Delta p_c \tag{2-68}$$

式中 $\Delta p_L$——输送管道的压力损失，Pa；

$\Delta p_m$——分级机本体压力损失，Pa，可按表 2-39 参考选取；

$\Delta p_c$——旋风分离器压力损失，Pa，可按表 2-40 参考选取。

3. 离心风机的选型参数确定

以上计算可得出系统的设计风量 $q_V$ 和系统的总压力损失$\Delta p$，根据风机的选型规定，其风量应有 10%富裕，压头应有 20%富裕，由此可得出离心风机的选型参数。

## 四、设备选型

1. 蜗壳式分选系统

（1）蜗壳式分级机。蜗壳式分级机属于一种气流式分选机，其外形结构参见图 2-34。分选机的外形就像一个蜗牛壳，其工作原理是：飞灰随高速气流进入分级机，在机壳内做圆周运行时，在径向受到离心力和涡流负压引力（黏性阻力）的作用。离心力与飞灰的质量和切向速度的平方成正比而与曲率半径成反比。因此，质量较大的飞灰具有较大的离心力。当离心力克服涡流负压的作用时，飞灰就逐渐向外侧运动并最终碰到外侧壁面，在重力作用下，飞灰下落至分选粗灰库。小质量的飞灰由于离心力无法克服涡流负压的作用而被吸入蜗壳，然后随气流进入下一级的旋风分离器被收集到分选细灰库，从而实现了以某一临界质量为分割点的大小质量飞灰的分离。

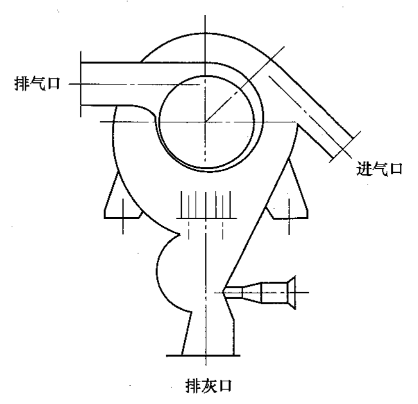


图 2-34 蜗壳式分级机外形结构图

分级机蜗壳顶部一般采用内衬高耐磨陶瓷的拆卸式顶盖，磨损后可拆换，机内易磨部位均衬高耐磨陶瓷。分级机中没有叶轮等转动设备，没有轴承，机械部件少；不用电动机和变频器，结构简单。

常用蜗壳式分级机的主要技术参数见表 2-39。

**表 2-39 蜗壳式分级机的主要技术参数**

| 分级机型号 | GFX-10 | GFX-20 | GFX-30 | GFX-40 | GFX-60 |
|---|---|---|---|---|---|
| 处理量（t/h） | 5～10 | 15～20 | 25～30 | 40～50 | 50～60 |
| 压力损失（Pa） | 1500～2000 | 1500～2000 | 2000～2500 | 2000～2500 | 2000～2500 |
| 分级粒径（μm） | 45 | | | | |
| 成品灰等级 | Ⅰ、Ⅱ级细灰 | | | | |
| 细灰产出率（%） | 40～70（根据原灰粒径分布确定） | | | | |
| 分选效率（%） | ≥85 | | | | |
| 灰气比（kg/kg） | 0.8～1.2 | | | | |
| 超载能力（%） | 10～20 | | | | |

（2）旋风分离器。旋风分离器为系统收集Ⅰ、Ⅱ级细灰的设备，属于一种气流式分离器，其结构参见图 2-35，其工作原理与旋风除尘器相同，即利用含尘气体进入旋风筒后的离心力和粉尘的重力，使细灰从气体中分离出来。含尘气体沿切线方向导入分离器的外壳和排气管之间，形成旋转向下的外旋流。悬浮于

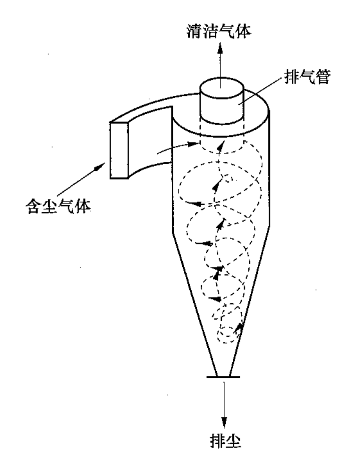


图 2-35 旋风分离器结构图

外旋流的粉尘在离心力的作用下移向内壁，并随外旋流转到分离器下部，同时在重力的作用下掉落至由排灰管排出。净化后的气体形成上升的内旋流并经过分离器排气管排出。

分选系统中，一般每套系统设一套2台旋风分离器，并联使用、同时运行。旋风分离器的易磨损部位，均衬有高耐磨陶瓷片。

常用旋风分离器（一套2台）的主要技术参数见表2-40。

**表2-40 常用旋风分离器（一套2台）的主要技术参数**

| 系列型号 | CZT | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 分离器直径（mm） | 1000 | 1400 | 1700 | 2200 | 2400 |
| 处理风量（$m^3/h$） | 约10000 | 约20000 | 约30000 | 约50000 | 约60000 |

续表

| 压力损失（Pa） | 2000～2500 | 2000～2500 | 2500～3000 | 2500～3000 | 2500～3000 |
|---|---|---|---|---|---|
| 成品灰等级 | Ⅰ、Ⅱ级细灰 | | | | |
| 收尘效率（%） | ≥90 | | | | |
| 超载能力（%） | 10～20 | | | | |

（3）离心风机。一般每套分选系统设置一台高压单级离心风机，风机叶片采用耐磨材料。离心风机的风量和风压应根据分选系统计算后确定，一般闭式分选系统离心风机的风量为5000～100000$m^3/h$；风压为10kPa左右。

除上述风量、风压要求外，作为分选系统的动力源，离心风机在选型时要尽量选择高效区宽的机型，以适应尽可能多的使用工况。统计现有的分选系统发现，离心风机一般采用9-26型或9-19型。

分选系统典型离心风机结构见图2-36。

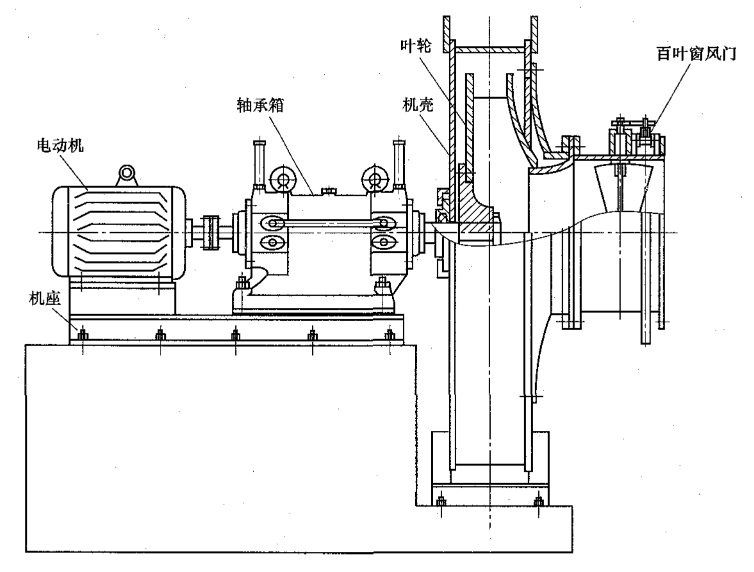



图2-36 分选系统典型离心风机结构图

常用9-26型离心风机的主要技术参数见表2-41；常用9-19型离心风机的主要技术参数见表2-42。

**表2-41 常用9-26型离心风机的主要技术参数**

| 机号 | 转速（r/min） | 风量（$m^3/h$） | 全压（Pa） | 内效率（%） | 内功率（kW） | 所需功率（kW） | 电动机 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 型号 | 功率（kW） |
| 5A | 2900 | 4293～6349 | 6035～5381 | 77.2～72.7 | 9.12～12.81 | 10.5～14.7 | Y160M2-2 | 15 |
| | | 6762 | 5180 | 70 | 13.65 | 15.7 | Y160L-2 | 18.5 |
| 5.6A | 2900 | 6032～7185 | 7610～7400 | 77.2～78 | 16.09～18.47 | 18.5～21.2 | Y180M-2 | 22 |
| | | 7766～9500 | 7218～6527 | 76.7～70 | 19.79～24.06 | 22.8～27.7 | Y200L1-2 | 30 |
| 6.3A | 2900 | 8588～11883 | 9698～8915 | 72.2～74.9 | 28.99～38.12 | 33.3～43.8 | Y225M-2 | 45 |
| | | 12699～13535 | 8636～8310 | 72.7～70 | 40.67～43.35 | 46.8～49.9 | Y250M-2 | 55 |

续表

| 机号 | 转速（r/min） | 风量（m³/h） | 全压（Pa） | 内效率（%） | 内功率（kW） | 所需功率（kW） | 电动机 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 型号 | 功率（kW） |
| 7.1D | 2900 | 12292～14643 | 12427～12078 | 77.2～78 | 52.70～60.49 | 61.8～71.0 | Y280S-2 | 75 |
| | | 15826～19360 | 11776～10635 | 76.7～70 | 64.84～78.82 | 76.1～92.5 | Y315S-2 | 110 |
| 8D | 2900 | 17584～20947 | 15955～15504 | 77.2～78 | 95.72～109.86 | 112.3～128.9 | Y315M-2 | 132 |
| | | 22640～27696 | 15112～13634 | 76.7～70 | 117.75～143.14 | 138.2～168.0 | Y315L2-2 | 200 |
| 12.5D | 1450 | 33540～41925 | 9713～9356 | 81.2～80.4 | 108.91～131.3 | 127.8～154.1 | Y315L1-4 | 160 |
| 14D | 1450 | 47121～53011 | 12285～12109 | 80.4～81.2 | 191.94～210.78 | 225.3～247.3 | Y335M2-4 | 250 |
| | | 58902～82463 | 11830～10095 | 80.4～70 | 231.39～319.16 | 271.5～374.3 | JS138-4 | 410 |
| 16D | 1450 | 70339～79131 | 16250～16014 | 80.4～81.2 | 374.22～410.95 | 439.1～482.2 | JSQ147-4 | 500 |
| | | 87923～123090 | 15640～13324 | 80.4～70 | 451.14～622.26 | 529.4～730.2 | JSQ158-4 | 850 |

**表 2-42　　常用 9-19 型离心风机的主要技术参数**

| 机号 | 转速（r/min） | 风量（m³/h） | 全压（Pa） | 内效率（%） | 内功率（kW） | 所需功率（kW） | 电动机 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 型号 | 功率（kW） |
| 5.6A | 2900 | 2622～3619 | 7182～7109 | 72.7～78.5 | 6.05～8.88 | 7.0～10.2 | Y160M1-2 | 11 |
| | | 3996～4901 | 6954～6400 | 77.2～70.5 | 9.76～12.09 | 11.2～13.9 | Y160L-2 | 18.5 |
| 6.3A | 2900 | 3220～5153 | 9149～9055 | 72.7～78.5 | 10.91～16.00 | 12.5～18.4 | Y160L-2 | 18.5 |
| | | 5690～6978 | 8857～8148 | 77.2～70.5 | 17.59～21.79 | 20.2～25.1 | Y200L1-2 | 30 |
| 7.1D | 2900 | 4610～7376 | 11717～11596 | 72.7～78.5 | 19.83～29.09 | 23.3～34.1 | Y200L2-2 | 37 |
| | | 8144～9988 | 11340～10426 | 77.2～70.5 | 31.98～39.65 | 37.5～46.5 | Y250M-2 | 55 |
| 8D | 2900 | 6594～11649 | 15034～14546 | 72.7～77.2 | 36.02～58.08 | 42.3～68.2 | Y280S-2 | 75 |
| | | 12968～14287 | 14021～13362 | 74.5～70.5 | 64.71～71.95 | 75.9～84.4 | Y315S-2 | 110 |
| 12.5D | 1450 | 12577～18447 | 9229～9068 | 76.5～81.5 | 40.84～56.72 | 47.9～66.6 | Y280S-4 | 75 |
| | | 21381～30186 | 9068～7822 | 81～70 | 64.46～91.17 | 75.6～107.0 | Y315S-4 | 110 |
| 14D | 1450 | 17670～25916 | 11668～11771 | 76.5～81.5 | 71.97～99.96 | 84.5～117.3 | Y315M-4 | 132 |
| | | 30040～42409 | 11464～9878 | 81～70 | 113.59～160.69 | 133.3～188.6 | Y335M-4 | 220 |
| 16D | 1450 | 26377～50995 | 15425～14488 | 76.5～78.2 | 140.31～249.98 | 164.6～293.3 | Y355M3-4 | 315 |
| | | 57150～63305 | 13808～13035 | 74.5～70 | 280.88～313.29 | 329.6～367.6 | JS138-4 | 410 |
| 17D | 1450 | 64792 | 11508 | | | | Y4502-4 | 400 |

注　表中 17D 机型为非标产品。

2. 蜗轮式分选系统

（1）蜗轮式分级机。蜗轮式分级机为一种配变频调速电动机、带旋转蜗轮的离心式分选机。其外形结构参见图 2-37。其工作原理是：飞灰随高速气流进入分级机的分选仓，分选仓的中上部设有一个旋转的蜗轮，飞灰颗粒由于受到离心力 $F_c$（与颗粒直径的立方成正比）与气动阻力 $F_d$ 两种力作用，较细颗粒由于

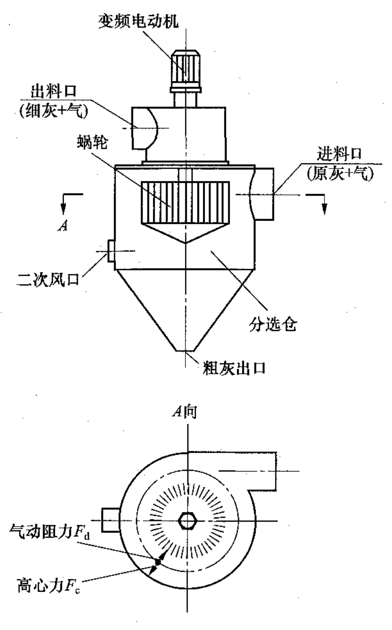



图 2-37　蜗轮式分级机结构图

$F_d>F_c$ 而向蜗轮靠拢，并穿过蜗轮、导向到出料口，经下一级旋风分离器收集成为成品细灰；较粗颗粒由于 $F_d<F_c$ 而向外运行，在仓壁处减速，因重力落下成为粗灰，二次风口也通向分选仓，二次风可使较粗颗粒中的细灰被再次托举进分选收集，从而最大限度地提高了分选效率。同时，蜗轮转速是由变频电动机控制的，通过变频器可以任意调节蜗轮转速，蜗轮转速越快，离心力 $F_c$ 越大，进入分级蜗轮的颗粒越细，即成品细灰颗粒越细，一旦蜗轮转速确定，系统风量不变，则分级机分级颗粒也保持相对稳定。

蜗轮式分级机的分选仓内部设有旋转叶轮，顶部设有变频调速电动机，因此其结构比蜗壳式分级机复杂，机内易磨部位一般均衬高耐磨陶瓷。

常用蜗轮式分级机的主要技术参数见表 2-43。

表 2-43　常用蜗轮式分级机的主要技术参数

| 处理量（t/h） | 10～50 | 50～100 | 100～150 | 150～200 |
|---|---|---|---|---|
| 压力损失（Pa） | 约 4000 | 约 4000 | 约 4500 | 约 4500 |
| 变频电动机功率（kW） | 7.5～15 | | | |
| 分级粒径（μm） | 45 | | | |
| 成品调节范围（%） | 3～18（45μm 筛余） | | | |
| 分选效率（%） | ≥85 | | | |

（2）旋风分离器。蜗轮式分选系统采用的旋风分离器结构与蜗壳式系统相同。

（3）离心风机。蜗轮式分选系统采用的耐磨离心风机结构与蜗壳式系统相同。

## 五、系统图

典型的粉煤灰分选系统图参见图 2-38。

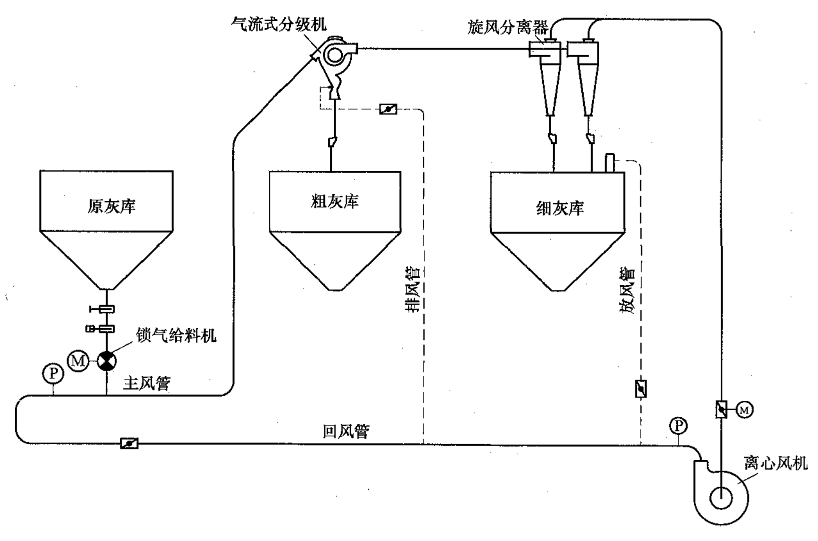



图 2-38　典型的粉煤灰分选系统图

# 第三章

# 水力输送系统

水力输送系统是以水为输送动力和介质，将物料通过管道输送的系统。水力输送系统可输送灰渣、尾矿、河砂、污泥等遇水不变质或不怕变质的物料。水力输送系统不受气候和地理条件影响，可采用空间输送线路；输送过程中不污染环境，占地少；输送能力大，输送距离长。

在火力发电厂，水力输送系统常用于灰渣的输送，所以通常称为水力除灰系统，系统范围从锅炉排渣、排灰设备至贮灰场或灰渣综合利用场所。水力除灰系统主要包括除灰渣供水系统、灰渣沟系统、水力喷射器输送系统、灰渣泵输送系统、制浆和沉渣池系统。

## 第一节　除灰渣供水系统

除灰渣供水系统一般由泵和管道、阀门及各类必需的仪表组成，主要指为除灰渣系统提供各种用水的系统（包括冲渣、冲灰、粒化、水封和熄火冷却、制浆及渣水闭式循环系统等）。

### 一、系统简介

除灰渣供水系统通常分为4类：①湿式除渣供水系统，包括刮板捞渣机+渣仓系统、水封排渣斗+水力喷射器系统、刮板捞渣机+渣浆泵系统、灰渣沟+激流喷嘴系统4个分系统。②干式除渣供水系统，包括干渣机+渣仓系统。③除灰供水系统，包括除尘器或灰库加湿搅拌或制浆系统。④除石子煤供水系统，包括水封石子煤斗+水力喷射器系统。灰渣沟+激流喷嘴系统仅包括泵和管道，系统简单，后面不作介绍。干式除渣供水系统仅有干灰（渣）的搅拌用水，比较单一，也不作介绍。

（一）湿式除渣供水系统

1. 刮板捞渣机+渣仓系统

刮板捞渣机+渣仓系统主要有4种：自动反冲洗过滤器+管（板）式换热器式渣水循环系统、高效浓缩机+机力冷却塔渣水处理冷却循环系统、渣水自然冷却闭式循环系统、刮板捞渣机维持水位自平衡的渣水系统。

（1）自动反冲洗过滤器+管（板）式换热器式渣水循环系统。刮板捞渣机溢流水由排水管排入沉淀水池和缓冲水池内，经澄清后由渣水循环泵送至除渣供水系统再利用。为了保证刮板捞渣机冷却水温度，在渣水循环泵出口设过滤器和管（板）式换热器，以便将回收水进一步冷却。管（板）式换热器冷却用水来自热机专业的闭冷水系统，冷却水的排水返回到该系统。此系统中，刮板捞渣机溢流水的处理和回收水系统主要由沉淀水池、缓冲水池、渣水循环泵、过滤器和管（板）式换热器等部分组成。系统的补充水来自循环水排水或其他水源。典型系统图如图3-1所示。

（2）高效浓缩机+机力冷却塔渣水处理冷却循环系统。刮板捞渣机的溢流水通过溢流水泵输送至高效浓缩机，渣水在高效浓缩机内澄清后进入调节水池，再经调节水泵升压至机力冷却塔。经机力冷却塔冷却降温后的水由除渣水泵送回刮板捞渣机重复使用。系统的补充水来自循环水排水或其他水源。典型系统图如图3-2所示。

（3）渣水自然冷却闭式循环系统。刮板捞渣机的溢流水经排水沟进入集水池，通过溢流水泵输送至高效浓缩机，渣水经高效浓缩机澄清后排入清水池。在此过程中溢流水自然冷却，最后由回水泵送回刮板捞渣机重复使用。典型系统图如图3-3所示。

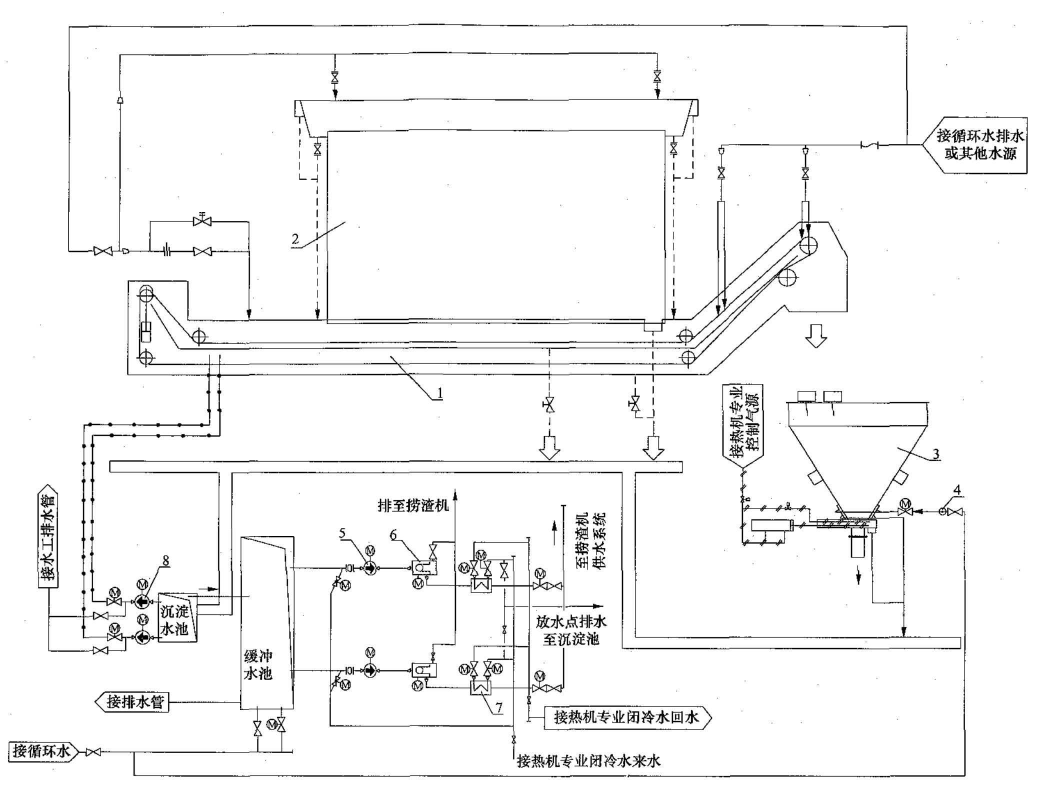



图 3-1　自动反冲洗过滤器+管（板）式换热器式渣水循环系统图

1—刮板捞渣机；2—渣井；3—渣仓；4—管道泵；5—渣水循环泵；6—自动反冲洗过滤器；7—管（板）式换热器；8—排污水泵

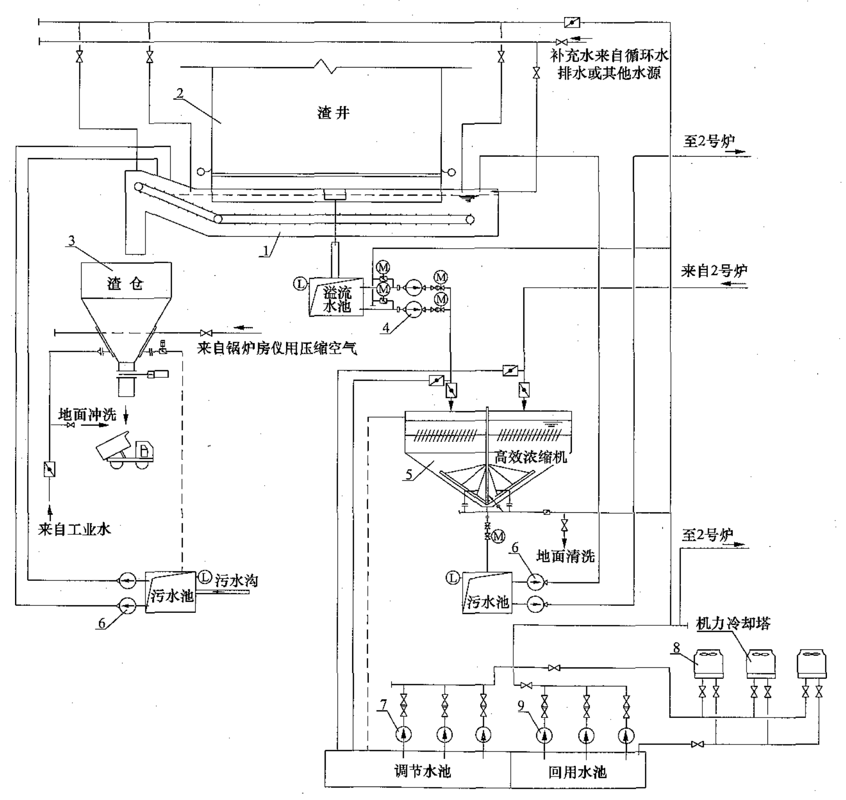



图 3-2　高效浓缩机+机力冷却塔渣水处理冷却循环系统图

1—刮板捞渣机；2—渣井；3—渣仓；4—溢流水泵；5—高效浓缩机；6—排污水泵；7—调节水泵；8—机力冷却塔；9—除渣水泵

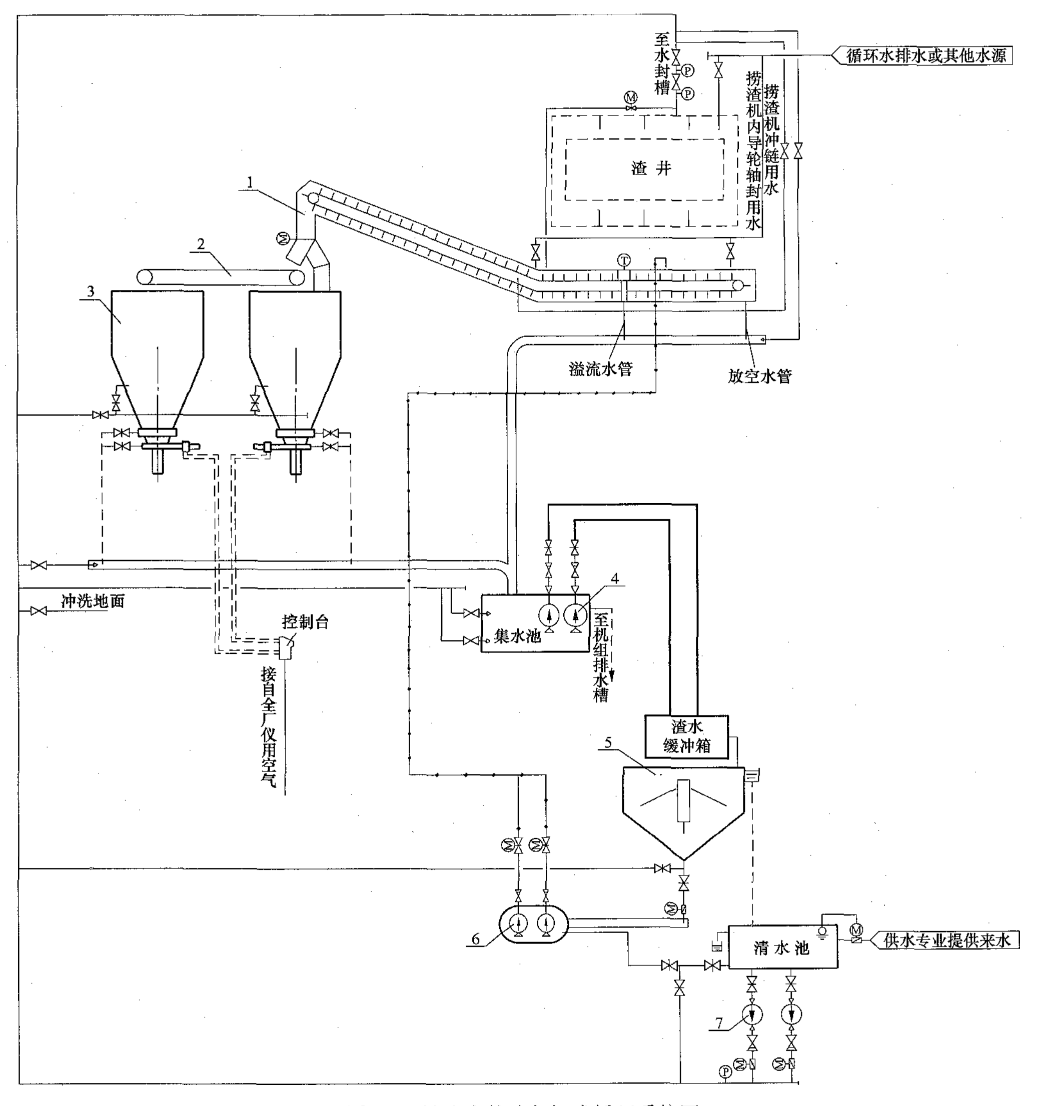



图 3-3 渣水自然冷却闭式循环系统图

1—刮板捞渣机；2—带式输送机；3—渣仓；4—溢流水泵；5—高效浓缩机；6—排泥泵；7—回水泵

（4）刮板捞渣机维持水位自平衡的渣水系统。刮板捞渣机的正常用水量由链条冲洗水和导轮轴封水供给，通过一套渣水液位控制装置与水位补水阀自动联锁控制，使捞渣机内辐射蒸发和渣带走的水量平衡，正常运行时实现无溢流水方式运行（刮板捞渣机槽体内水位到达标尺低位时补水，到达标尺高位时补水停止）。

当锅炉结大焦或渣量大增，通过刮板捞渣机渣水控制装置无法满足要求时，通常采用两种处理方式：

1）加大冷却水补给量，允许刮板捞渣机溢流水排入溢流水池。溢流水经水池等降温后由排水泵返回刮板捞渣机，形成内部循环。

2）当采用第 1）种方式运行后渣水温度仍不能得到控制，此时增大刮板捞渣机补水量，将温度较高的溢流水通过排水泵送至沉煤池。

此系统的主要设备包括排水泵、液位控制系统等。典型系统图如图 3-4 所示，液位控制装置简图如图 3-5 所示，液位控制装置安装示意图如图 3-6 所示。

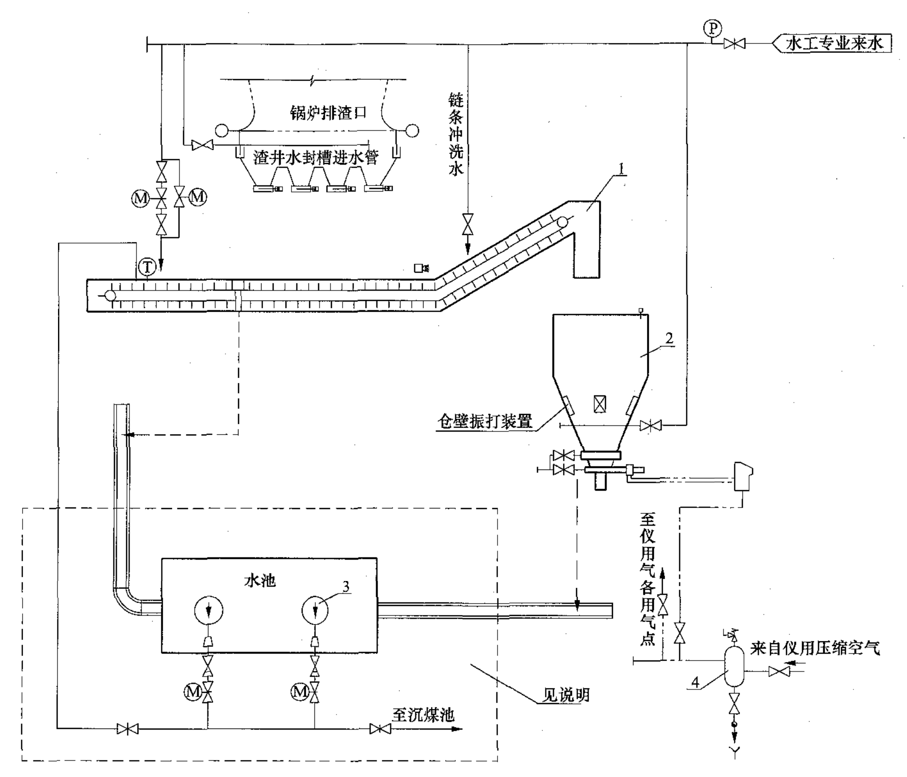



图 3-4　刮板捞渣机维持水位自平衡的渣水系统图

1—刮板捞渣机；2—渣仓；3—排水泵；4—储气罐

说明：虚线框内部分仅在紧急情况下使用。

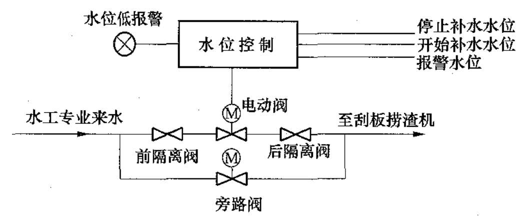



图 3-5　自平衡系统液位控制装置简图

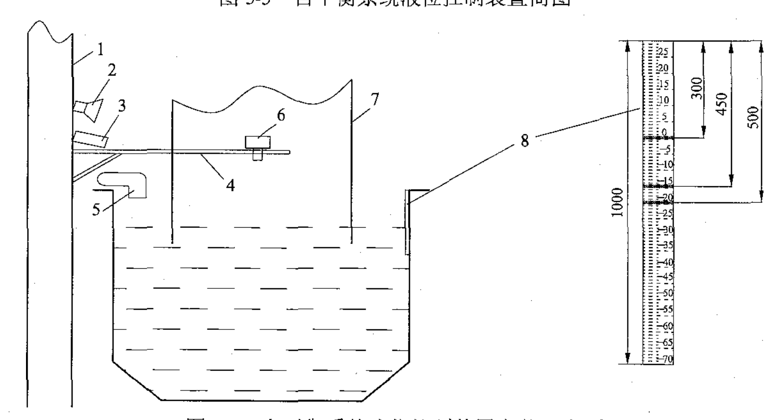



图 3-6　自平衡系统液位控制装置安装示意图

1—捞渣机上升段处锅炉钢梁；2—照明射灯；3—电视摄像头；4—液位计支撑；5—捞渣机水封补水口；6—超声波液位计；7—锅炉水封板；8—就地水封液位标尺（采用槽钢，刷白漆，高 1.5m）

说明：在刮板捞渣机水位测点附近设置一块水位标尺，一台照明灯，将一台监视电视探头移至水位标尺处，利用辅控盘的工业电视进行水位的辅助监视。

以上 4 种渣水系统中，第 1 种与第 4 种系统较简单，使用设备少。第 2 种与第 3 种系统较复杂，占地面积大。第 1 种系统中的管（板）式换热器因为结垢等原因易堵塞，第 2 种系统设置机力冷却塔设备，渣水降温能力强。第 3 种和第 4 种系统是较常用的系统。特别是第 4 种，最近几年采用较多，目前大多用于渣量小于 10t/h 的机组。

2. 水封排渣斗+水力喷射器系统

冷却水泵为锅炉提供冷却水；锅炉水封排渣斗的溢流水进入溢流水池，由溢流水泵送至澄清池处理后供系统循环使用；低压水泵为水封排渣斗提供补水及脱水仓的反冲洗用水；高压水泵为水力喷射器提供高压喷射水；反冲洗水泵为澄清水箱提供反冲洗用水。系统补水来自循环水排水或其他水源。典型系统图如图 3-7 所示。

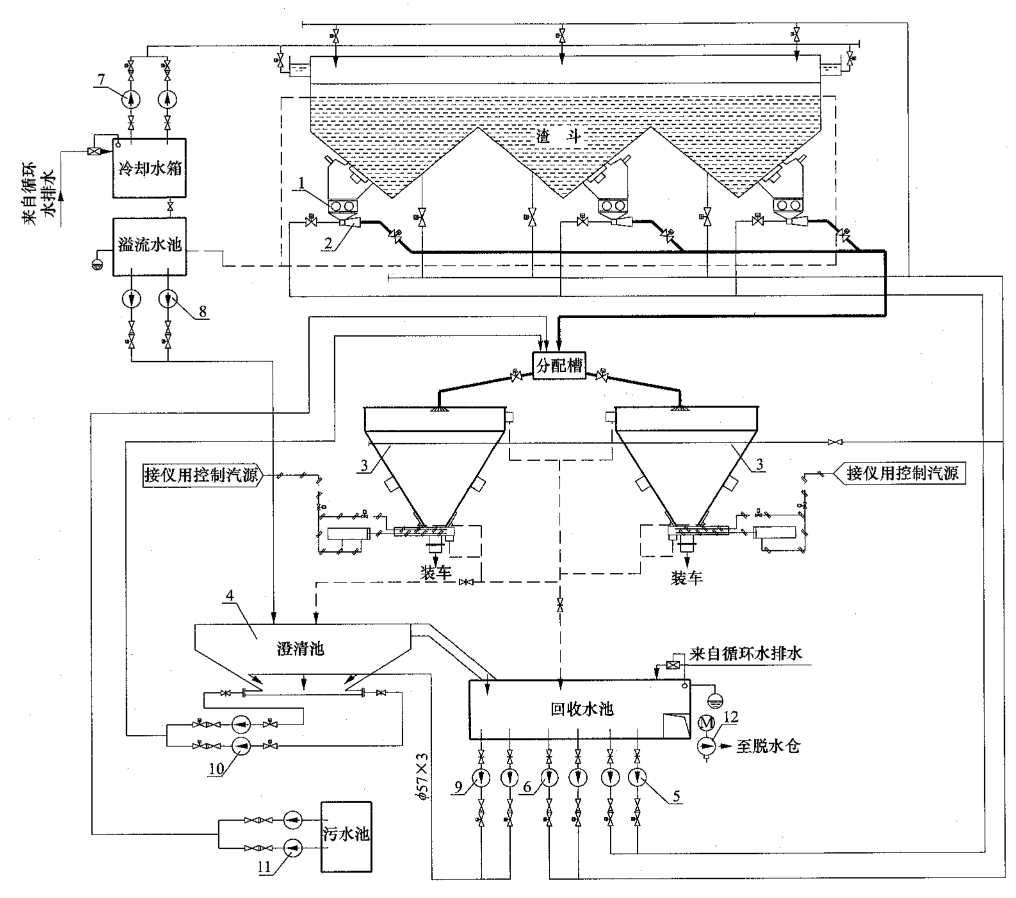



图 3-7　水力排渣装置+水力喷射器系统

1—碎渣机；2—水力喷射器；3—脱水仓；4—澄清水箱；5—高压水泵；6—低压水泵；7—冷却水泵；8—溢流水泵；9—反冲洗水泵；10—排浆泵；11—排污泵；12—潜污泵

3. 刮板捞渣机+渣浆泵系统

刮板捞渣机的溢流水与渣一起通过渣沟排入渣浆池，由渣浆泵输送至脱水仓。脱水仓脱出的水经高效浓缩机澄清后排入清水池，最后由除灰水泵送回刮板捞渣机重复使用。系统补水来自循环水排水或其他水源。典型系统图如图 3-8 所示。

（二）除灰供水系统

除灰供水系统是指为双轴搅拌机、箱式冲灰器、搅拌桶等制浆设备提供用水的系统，主要设备为除灰水泵；还有灰渣混除的除灰供水系统，一般设两种水泵，一种是冲渣水泵，主要供排渣槽的冲渣喷嘴和灰渣沟的激流喷嘴用水；另一种为冲灰水泵或搅拌水泵，主要用于双轴搅拌机、箱式冲灰器、搅拌桶等的用水。典型系统图如图 3-9 所示。

（三）除石子煤供水系统

水力输送石子煤的供水系统中，高压水泵为水力喷射器提供高压喷射水，低压水泵向石子煤斗提供低压密封冷却水。典型系统流程如图 3-10 所示。

图 3-8　刮板捞渣机+渣浆泵系统图

1—刮板捞渣机；2—碎渣机；3—脱水仓；4—高效浓缩机；5—排泥泵；6—除灰水泵；7—搅拌水泵；8—排渣泵；9—排污泵；10—电动灰渣沟插板门；11—潜污泵

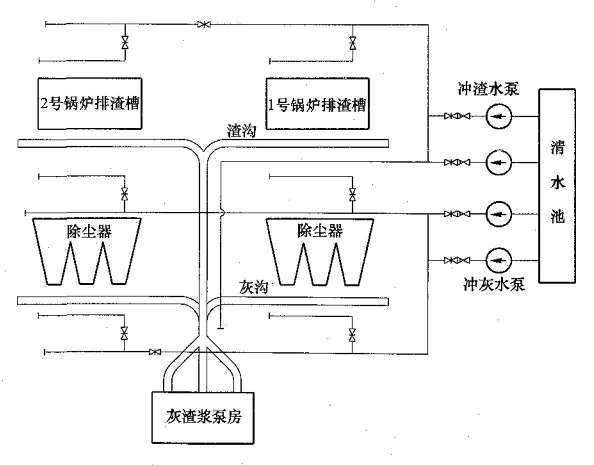



图 3-9　灰渣混除的供水系统图

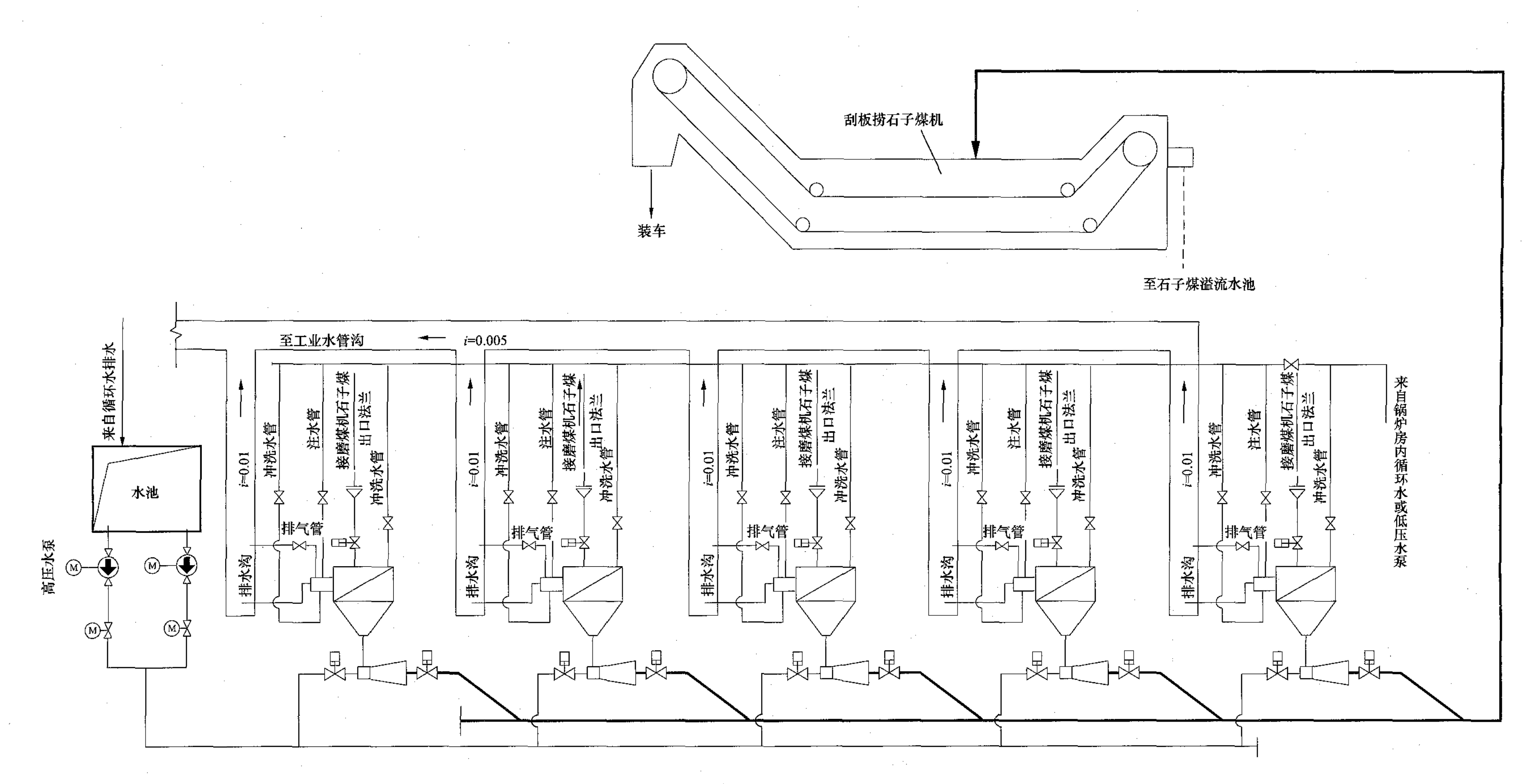



图3-10　典型的水封式石子煤斗水力喷射器输送系统图

## 二、设计要求

（1）水力除灰系统各种水泵的流量一般为计算水量的105%，出口压力一般为计算压力的110%～120%，并满足表3-1的要求。

表3-1　各种水泵出口压力数据

| 序号 | 水泵名称 | 压力（MPa） |
|---|---|---|
| 1 | 除渣（冲洗）水泵 | >0.8 |
| 2 | 冲灰水泵 | >0.6 |
| 3 | 粒化水泵① | >0.2 |
| 4 | 水封和熄火冷却水泵 | >0.15 |

① 粒化水泵仅用于液态排渣槽。

（2）供水系统使用的各种水泵，每种水泵宜各设一台备用泵。高压水泵考虑高压电动机不宜短时间频繁启停，也可按照每台炉各设一台备用泵。

（3）水封式排渣斗冲渣后的补充水如果由除渣（冲洗）水泵供给，则除渣（冲洗）水泵的容量还应考虑能在15～20min内将渣斗充满水的要求。

（4）除灰渣系统的溢流排水回收后重复用于除灰渣系统时，供水泵一般选用杂质泵。

（5）除灰渣系统清水管道的流速按表3-2选取。

表3-2　清水管道规定流速

| 介质 | 管　道 | 流速（m/s） |
|---|---|---|
| 清水 | 离心水泵吸水管道 | 0.5～1.5 |
|  | 离心水泵出水管道和其他压力水管道 | 2～3 |
|  | 无压力排水管道 | <1.0 |

## 三、设计计算

### （一）供水泵计算

1. 流量计算

（1）水封和熄火冷却水泵。锅炉排渣装置的水封和熄火冷却用水，在喷嘴入口处的压力应大于0.15MPa。水封及熄火冷却用水应保证连续供应，水量及水质应由制造厂家提供。在未取得制造厂家资料时，水量可按式（3-1）计算

$$Q_{sh}=\frac{189G_z+13A}{t_{s2}-t_{s1}} \tag{3-1}$$

式中　$Q_{sh}$——除渣冷却水量，包括锅炉排渣装置的水封和熄火冷却用水，m³/h；

$G_z$——锅炉每小时排渣量，t/h；

$A$——锅炉炉膛排渣口面积，m²；

$t_{s1}$——冷却水进水温度，℃；

$t_{s2}$——冷却水溢流水温度，可取60℃。

式（3-1）是根据热平衡原理推导而成，该公式也适用于刮板捞渣机系统熄火冷却水量的计算。

（2）冲灰水泵。计算箱式冲灰器、搅拌桶、水力混合器等制浆设备的耗水量，再计算灰渣沟激流喷嘴的耗水量（单个喷嘴的流量及制浆设备的耗水量见本章第五节相关内容），最终算出总的冲灰水量，然后按规定的富裕系数计算出冲灰水泵的流量。

（3）除渣（冲洗）水泵。

1）水封排渣斗。示意图参见图3-11。其工作过程为：炉膛下部的水封斗容积为70～90m³，采用流动的冷却水作为炉下密封介质，高温炉渣在水斗内冷却粒化；由控制阀操纵气缸，使排渣门动作，进行定期出渣。排出的渣经碎渣机一级破碎后排入渣沟或水力喷射器。其主要优点是密封性能好，高温渣冷却快、粒化效果好，运行安全，操作简便。其瞬时排出至渣沟或渣管的水量除与水封斗容积有关外，还与排渣门的开度等因素有关，其水量可由式（3-2）计算

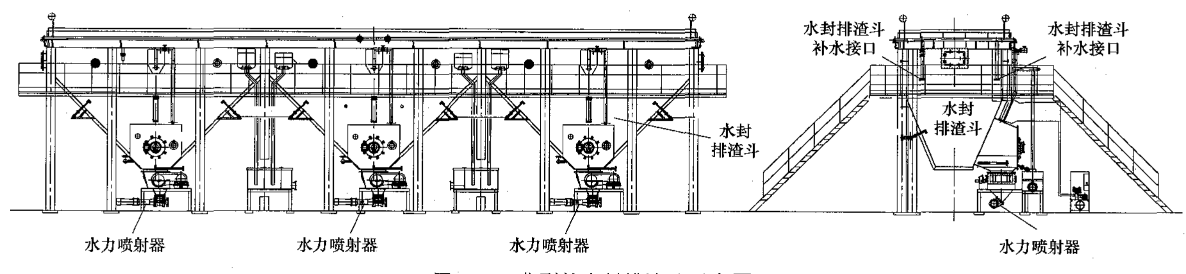



图3-11　典型的水封排渣斗示意图

$$Q_{cz}^{sf}=\frac{\left(V_{sf}-\frac{G_z^o T_z}{\rho_z}\right)\times 60}{t_{sf}} \tag{3-2}$$

式中　$Q_{cz}^{sf}$——水封排渣斗冲渣时的水量，m³/h；

$V_{sf}$——水封排渣斗的有效水容积，m³；

$G_z^o$——排入每个水封排渣斗的渣量，t/h；

$T_z$——排渣周期，h；

$\rho_z$——渣的真实密度，t/m³，见附录B；

$t_{sf}$——每个水封排渣斗的冲洗时间，min，一般应控制在15～20min。

此型水封排渣斗的水封斗为W形，排渣时两侧渣斗依次排放。当水封斗中间有隔板时，两侧渣斗的水量计算相同。如无隔板，则先排放的一侧其水量比后排放的大，冲洗时间第一侧比第二侧长约一倍。此外，这种排渣斗的两侧及后部还有辅助冲渣喷嘴，冲渣时除水封排渣斗内的水放入渣沟外，还要考虑开启着的辅助喷嘴的水量，这部分水量按式（3-20）计算。按式（3-2）计算出的水量一般都较大，故要求排渣斗下的渣沟断面适当加大，渣沟起点深度也相应加大至900mm，以防渣水漫流。

2）水封排渣斗的补充水量计算。锅炉制造厂要求水封槽的充水时间控制在 15～20min，其补充水量按式（3-3）计算

$$Q_b = V_{sf} \times \frac{60}{t_b} \tag{3-3}$$

式中 $Q_b$——水封排渣斗的补充水量，$m^3/h$；

$V_{sf}$——水封排渣斗的有效水容积，$m^3$；

$t_b$——水封排渣斗的充水时间，min。

根据式（3-2）和式（3-3）计算得到两个水量，应按水量大的选择除渣（冲洗）水泵。

3）机械排渣装置。机械排渣装置包括刮板捞渣机、圆盘捞渣机等不同类型的排渣装置。液态排渣锅炉通常配备圆盘捞渣机。这类装置的上部是一水封装置，机械捞渣设备装于水封的下部，典型的刮板捞渣机示意图参见图3-12。渣由刮板或圆盘连续排出，在排渣的同时溢流水也连续排入渣沟。

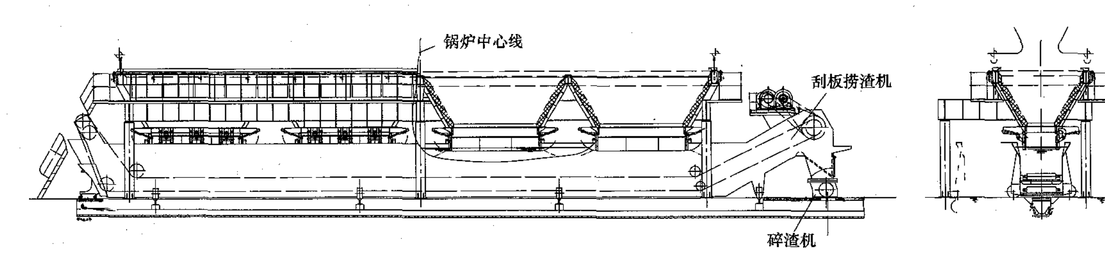



图3-12 典型的刮板捞渣机示意图

刮板捞渣机系统的熄火水量，可按渣水比计算，也可按式（3-1）计算。

近年来，随着除灰技术的发展，刮板捞渣机维持水位自平衡系统越来越多地被采用。刮板捞渣机维持水位运行时的冷渣水量估算按0.7～1.2倍渣量计（大渣量时取小值，小渣量取大值），此时渣水的最高温度宜控制在70℃以内。

（4）粒化水泵。

1）粒化用水的单位耗水量。液态排渣锅炉的炉渣必须采用冷却水使液态渣冷却、粒化。液态排渣槽的粒化水一般采用低温水源，并应保证连续供应。其水量、水压应按照制造厂家资料选取，当无资料时，粒化水在粒化水箱入口处的压力不应低于0.2MPa，粒化水箱的溢流水温不宜大于60℃，粒化用水的单位耗水量，可按式（3-4）计算

$$Q_{lh} = \frac{c_z(t_{z1}-t_{z2})+251}{c_s(t_2-t_1)} \tag{3-4}$$

$$c_z = 0.712+0.251\times10^{-3}(t_{z1}+t_{z2}) \tag{3-5}$$

式中 $Q_{lh}$——粒化用水的单位耗水量，t/t；

$c_s$——水的比热容，4.1868kJ/（kg·℃）；

$c_z$——渣的比热容，kJ/（kg·℃）；

$t_{z1}$——液态渣温度，采用锅炉热力计算数据；

$t_{z2}$——经粒化水冷却后渣的温度，按60℃选取；

$t_2$——粒化水箱的溢流水温度，按60℃选取；

$t_1$——粒化水箱的进水温度，按夏季最高温度选取，℃；

251——熔渣潜热，kJ/kg。

2）全部粒化水量

$$Q_{lhz}=n_y G_z Q_{lh} \tag{3-6}$$

式中 $Q_{lhz}$——全部粒化水量，$m^3/h$；

$n_y$——运行的液态炉台数，台；

$G_z$——每台液态炉的渣量，t/h。

2. 压力计算

对于无额定压力要求的供水泵，可按本章第四节的相关内容，先根据雷诺数算出清水阻力系数，再算出管道沿程阻力。

3. 供水泵功率计算

（1）供水泵的轴功率按式（3-7）计算

$$P_e = \frac{QH\rho}{3600\eta} \tag{3-7}$$

式中 $P_e$——水泵的轴功率，kW；

$Q$——泵的流量，$m^3/h$；

$H$——泵的扬程，kPa；

$\rho$——输送介质的密度，$t/m^3$；

$\eta$——泵的效率。

（2）供水泵电动机的额定功率 $P_M$ 按式（3-8）计算

$$P_M \geqslant K P_e \tag{3-8}$$

式中 $P_M$——供水泵电动机的额定功率，kW；

$P_e$——供水泵的轴功率，kW；

$K$——考虑重载启动和功率的储备系数，一般取1.15～1.2。

（二）脱水仓计算

1. 有效容积

每台脱水仓的有效容积是指最大存渣高度时的体积，按式（3-9）计算

$$V_{yx}=\frac{G_z t}{\rho_{zd}} \tag{3-9}$$

式中 $V_{yx}$——每台脱水仓的有效容积，$m^3$；

$G_z$——系统渣量，t/h；

$t$——需要储存的时间，h；

$\rho_{zd}$——渣堆积密度，$t/m^3$。

2. 总容积

每台脱水仓的总容积按式（3-10）计算

$$V_z=V_{yx}+1.1\pi D_1^2/4 \tag{3-10}$$

式中 $V_z$——每台脱水仓的总容积，$m^3$。

脱水仓柱体高度应按最大存渣高度加渣顶存水高度1.1m计算，即 $H_1=H_z+1.1$m（$H_z$为脱水仓的最大存渣高度，m）。

3. 脱水仓外形尺寸计算

脱水仓为钢结构的锥底圆柱形仓，由圆柱体和圆锥（台）体组成，外形计算简图参见图3-13。

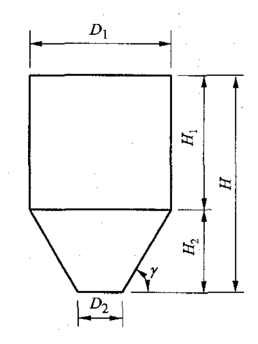



图3-13 脱水仓计算简图

脱水仓外形结构由圆柱体和圆锥体组成，总容积按式（3-11）计算

$$V_z=V_1+V_2 \tag{3-11}$$

$$V_1=(\pi D_1^2/4)H_1 \tag{3-12}$$

$$V_2=\pi H_2(D_1^2+D_2^2+D_1D_2)/12 \tag{3-13}$$

$$H_2=[(D_1-D_2)/2]\tan\gamma \tag{3-14}$$

式中 $D_1$——脱水仓直径，m，根据脱水仓总容积要求，按产品系列选取；

$D_2$——脱水仓排渣口直径，m，根据气动排渣门的标准规格要求，排渣口直径为900mm；

$H_1$——脱水仓圆柱部分高度，m；

$H_2$——脱水仓锥体部分高度，m；

$\gamma$——脱水仓锥体斜面与水平面的夹角，要求 $\gamma\geqslant 60°$。

（三）高效浓缩机计算

斜板高效浓缩机选型计算公式如下：

1. 高效浓缩机有效沉降面积

$$A=\frac{G}{7.06v_t\eta K} \tag{3-15}$$

式中 $A$——有效面积，$m^2$；

$G$——进浆量，$m^3/s$；

$v_t$——颗粒沉降速度（当无资料时，若固液比为1:10取0.54，若固液比为1:18取0.608，若固液比为1:20取0.99），mm/s；

$\eta$——有效面积系数，取$\eta$=0.9～0.95；

$K$——紊动修正系数，取$K$=0.8。

2. 浓缩机直径

$$D=\sqrt{\frac{4A}{\pi}}=0.4247\sqrt{\frac{G}{\eta v_t K}} \tag{3-16}$$

按式（3-16）求得的直径$D$，选取相应的标准系列高效浓缩机。

该选型公式适用于斜管（板）斜长为1000mm，斜管直径为50mm，倾角为60°的高效浓缩机。

## 四、主要设备选型

（一）脱水仓

脱水仓主要用于火力发电厂锅炉炉渣、石子煤的脱水、储存和卸料。渣浆进入脱水仓，经顶部不锈钢的分粒器分级，细颗粒通过分粒器进入脱水仓中心，大颗粒经分粒器甩向仓壁。脱水仓上部有底流挡板，使沉淀区水流平稳，利于沉降。溢流水通过锯齿围堰进入溢流槽，降低溢流水速，有效降低含灰量，溢流水经排水管进入回水系统。脱水仓内沉积的灰渣料位达到额定高度后便停止渣浆注入，然后经6～8h静置析水，使灰渣含水率低于25%后装车外运。脱水仓一般有三种析水方式，包括周边、中心和排渣门析水。析水元件通常采用不锈钢材质。

1. 技术要求

（1）每套脱水仓应设2台，1台接收渣浆，1台脱水、卸渣。

（2）脱水仓的容积应根据锅炉排渣量、外部运输条件等因素确定，每台脱水仓的有效容积不宜小于储存锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤种时24h的排渣量，且不宜小于燃用校核煤种时20h的排渣量。

（3）灰渣脱水的时间，由灰渣颗粒特性、化学成分和析水元件结构等因素决定，脱水仓的脱水时间宜

为 6～8h。

（4）脱水仓的排水经过澄清后应循环使用。每套脱水仓应配澄清池或高效浓缩机，澄清池直径或高效浓缩机出力可根据处理水量确定。当闭式循环渣水 pH 值较高或浮渣较多时，应设置加药系统辅助加酸中和及絮凝沉淀。

（5）脱水仓灰渣储存与卸料系统的保温和封闭措施应根据气象条件考虑。在寒冷地区，宜将锥部以下至 0m 进行保温封闭并采暖，对脱水、析水装置及管道进行保温；在严寒地区，宜室内装车，将整个脱水仓室内布置，保温封闭并采暖，对锥部斗壁、排渣门、脱水及析水装置和管道进行保温。脱水仓如布置在室内，应考虑室内通风及排放水蒸气的措施。

（6）脱水仓作为车船外运储存设施时，应设有就地装车操作室。

2. 设备选型

脱水仓由仓体、分粒器、底流挡板、溢流堰、滤水元件、排渣门、平台、振动器、支架等部分组成。常见 XHT 型脱水仓外形及基础见图 3-14。常见 XHT 型脱水仓主要技术参数及外形尺寸见表 3-3、表 3-4。

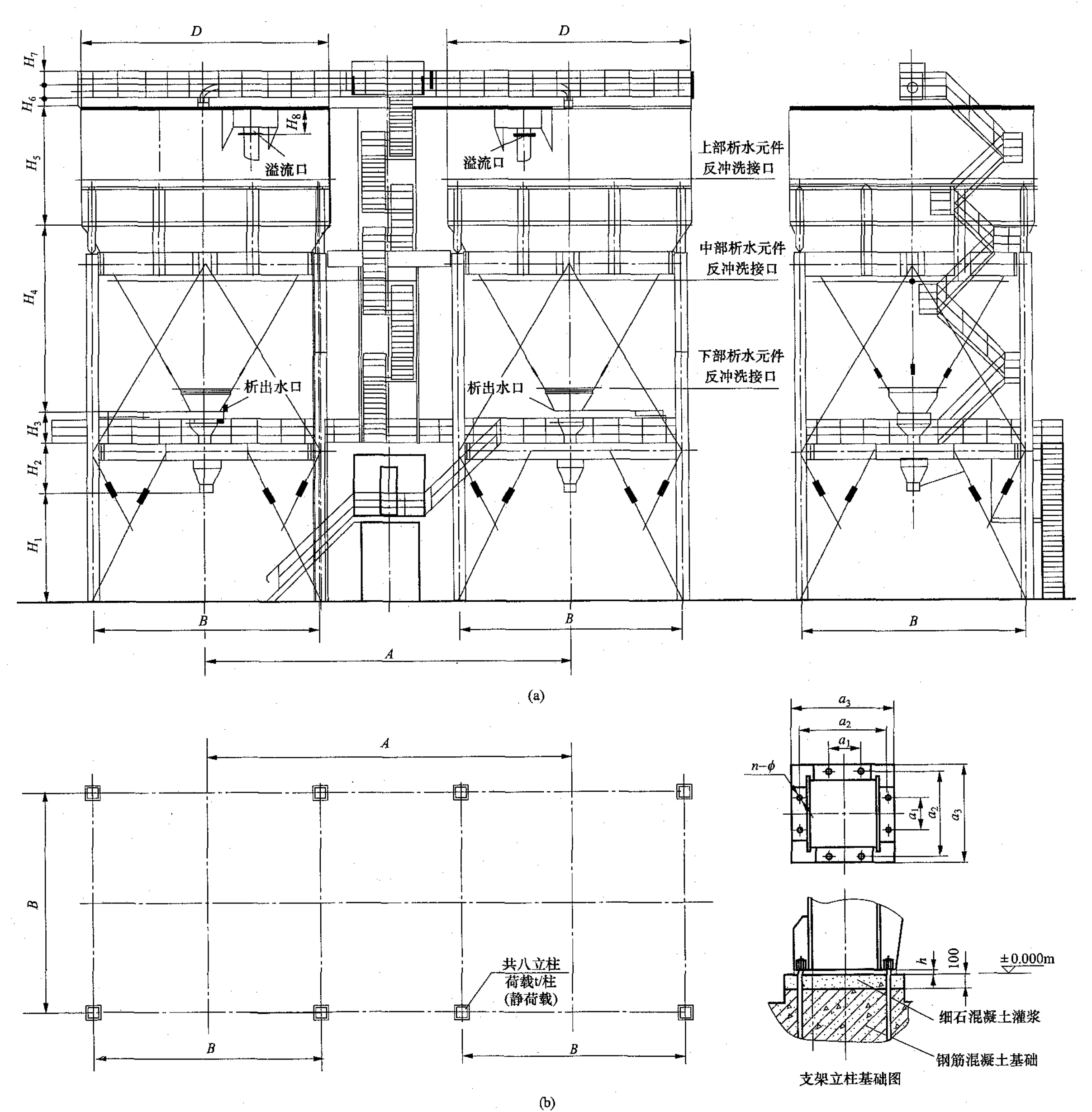



图 3-14　常见 XHT 型脱水仓外形及基础图

（a）XHT 脱水仓外形图；（b）XHT 脱水仓支架底面层安装基础布置图

表 3-3　　常见 XHT 型脱水仓主要技术参数

| 型号 | | XHT-5.4 | XHT-6 | XHT-7.6 | XHT-10 | XHT-12 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 仓体直径（m） | | 5.4 | 6 | 7.6 | 10 | 12 |
| 最大容量（$m^3$） | | 75×2 | 115×2 | 240×2 | 560×2 | 950×2 |
| 储存容积（$m^3$） | | 64×2 | 100×2 | 215×2 | 515×2 | 855×2 |
| 脱水时间（h） | | 6～8 | | | | |
| 脱水后渣含水率（%） | | <25 | | | | |
| 溢流水含渣量（mg/L） | | ≤2000 | | | | |
| 电源 | | $P$≤15kW，380V、50Hz，三相四线制 | | | | |
| 气源 | | $p$=0.6～0.8MPa，$Q$=0.3$m^3$/min | | | | |
| 反冲洗水源 | | $p$=0.6～0.8MPa，$Q$=0.3$m^3$/min | | | | |
| 料位计 | 型号 | UZZ-02（重锤物位计或用户选定） | | | | |
| | 数量（台） | 1 | | | | |
| 仓壁振荡器 | 型号 | CZ1000 | | | | |
| | 数量（台） | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 仓体自重（t） | | 35 | 42 | 60 | 98.5 | 135 |
| 支架自重（t） | | 32 | 38 | 48 | 102 | 115 |
| 荷载（t/柱） | | 40 | 60 | 120 | 270 | 450 |

表 3-4　　常见 XHT 型脱水仓外形安装尺寸

| 型号 | | XHT-5.4 | XHT-6 | XHT-7.6 | XHT-10 | XHT-12 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 仓体外形尺寸（mm） | $D$（外径） | 5420 | 6020 | 7620 | 10020 | 12020 |
| | $A$ | 8000 | 9000 | 10000 | 15000 | 15000 |
| | $H_1$ | 用户根据运载工具高度确定（一般为 4000～5000） | | | | |
| | $H_2$ | 900 | 1150 | 1400 | 1400 | 1400 |
| | $H_3$ | 1150 | 1150 | 1400 | 1400 | 1400 |
| | $H_4$ | 4156 | 4413 | 4878 | 7860 | 9590 |
| | $H_5$ | 2010 | 3000 | 3220 | 5000 | 5000 |
| | $H_6$ | 290 | 290 | 340 | 400 | 400 |
| | $H_7$ | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | $H_8$ | 1100 | 1234 | 913 | 1205 | 1145 |
| 基础布置尺寸（mm） | $B$ | 4980 | 5553 | 7040 | 9248 | 11090 |
| | $h$ | 25 | 25 | 25 | 30 | 40 |
| | $a_1$ | 220 | 270 | 360 | 230 | 265 |
| | $a_2$ | 450 | 470 | 560 | 620 | 710 |
| | $a_3$ | 500 | 550 | 650 | 720 | 850 |
| | $n$-$\phi$ | 8-$\phi$27 | 8-$\phi$30 | 8-$\phi$30 | 8-$\phi$34 | 8-$\phi$40 |
| 析水元件冲洗接口 | | PN1.0 DN100 | PN1.0 DN100 | PN1.0 DN100 | PN1.0 DN100 | PN1.0 DN100 |
| 溢流口 | | PN0.25 DN250 | PN0.25 DN350 | PN0.25 DN400 | PN0.25 DN500 | PN0.25 DN500 |
| 析水出口 | | PN1.0 DN150 | PN1.0 DN200 | PN1.0 DN200 | PN1.0 DN250 | PN1.0 DN250 |

（二）高效浓缩机

1. 技术要求

（1）脱水仓的排水经过澄清后循环使用，配套的澄清设施可采用澄清池或高效浓缩机。高效浓缩机底部排浆管道应设反冲洗水管道，澄清池应设搅动水源。冲洗或搅动水源水压不应小于 0.4MPa。

（2）高效浓缩机数量根据锅炉台数和处理总量合理配置，多台设备间宜相互备用。

（3）高效浓缩机出力应确保在入口污水悬浮物含量不大于 2500mg/L 时，溢流水中悬浮物含量不应大于 150mg/L。

（4）高效浓缩机耙架的周边速度一般为 3～4m/min。

（5）高效浓缩机、澄清池和缓冲水池应设置排污措施，排污（如沉积的灰渣）应送回脱水仓。

2. 设备参数

高效浓缩机主要由耙架、斜板、传动装置、耙架提升装置、给料装置和卸料装置等组成。高效浓缩机上层布置斜板斜管，加速灰渣沉淀，进水位置设置了稳流装置；下层布置带有自动提耙功能的转动耙，使得沉淀的灰渣往卸料口聚集排出，当浓缩机耙架转动的力矩超过限定值时，应能自动调整耙的高度；转动耙采用中心和周边两种传动方式，视工程具体情况选用。

常见 XNS 型高效浓缩机结构及外形见图 3-15。

常见中心传动 XNS 型高效浓缩机主要技术参数及外形尺寸见表 3-5、表 3-6。

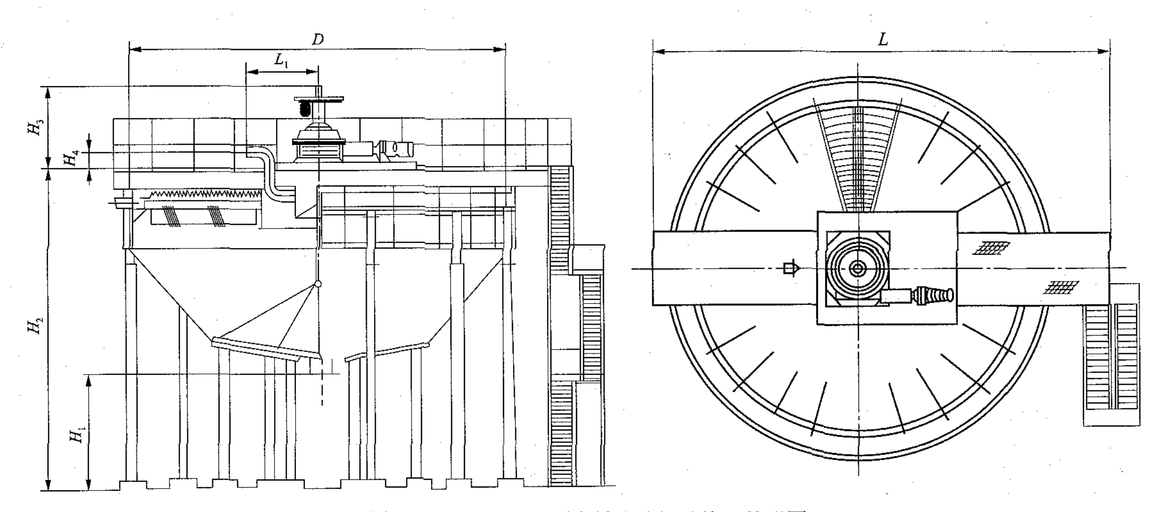



图 3-15 常见 XNS 型高效浓缩机结构及外形图

**表 3-5　常见中心传动 XNS 型高效浓缩机主要技术参数及外形尺寸（一）**

| 基本参数和名称 | 规格型号 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | XNS1-5 | XNS1-8 | XNS1-10 | XNS1-12 | XNS1-15 | XNS2-12 | XNS2-15 |
| 浓缩机直径 *D*（m） | 5 | 8 | 10 | 12 | 15 | 12 | 15 |
| 公称沉淀面积（m²） | 20 | 50 | 78 | 110 | 176 | 110 | 176 |
| 灰耙转速（r/min） | 0.08～0.19 | | | | | | |
| 灰耙提升高度（mm） | | | | | | | ≤300 |
| 灰浆处理量（m³/h） | 100 | 280 | 400 | 600 | 800 | 600 | 800 |
| 入口渣粒径（mm） | ≤5 | | | | | | |
| 入口灰水比 | 1:10 | | | | | | |
| 浓缩后灰水比 | 1:2 | | | | | | |
| 溢流水含渣量（mg/L） | ≤300 | | | | | | |
| 入口法兰 PN0.6 | DN100 | DN350 | DN350 | DN400 | DN800 | DN600 | DN400 |

续表

| 基本参数和名称 | 规格型号 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | XNS1-5 | XNS1-8 | XNS1-10 | XNS1-12 | XNS1-15 | XNS2-12 | XNS2-15 |
| 溢流口法兰 | PN0.6，DN500 | | | | | | |
| 出浆口法兰 | PN0.6，DN200 | | | | | | |
| $H_1$（mm） | 800 | 800 | 800 | 800 | 1000 | 800 | 800 |
| $H_2$（mm） | 6000 | 6500 | 7500 | 8400 | 8450 | 7000 | 8900 |
| $H_3$（mm） | 2000 | 2350 | 2350 | 2350 | 2350 | 2500 | 2500 |
| $H_4$（mm） | 200 | 250 | 300 | 300 | 350 | 300 | 350 |
| $L$（mm） | 6600 | 9600 | 11600 | 13600 | 16600 | 13600 | 16600 |
| $L_1$（mm） | 1500 | 2000 | 2500 | 2500 | 3000 | 2500 | 3000 |
| 浓缩机质量（t） | 30 | 40 | 53 | 60 | 76 | 63 | 80 |

**表 3-6　　常见中心传动 XNS 型高效浓缩机的主要技术参数及外形尺寸（二）**

| 基本参数和名称 | 规格型号 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | XNS3-8 | XNS3-10 | XNS3-12 | XNS3-15 | XNS3-18 | XNS3-20 |
| 浓缩机直径 $D$（m） | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 | 20 |
| 公称沉淀面积（$m^2$） | 50 | 78 | 110 | 176 | 254 | 310 |
| 灰耙转速（r/min） | 0.08～0.19 | | | | | |
| 灰耙提升高度（mm） | ≤300 | | | | | |
| 灰浆处理量（$m^3/h$） | 280 | 400 | 600 | 800 | 1300 | 1500 |
| 入口渣粒径（mm） | ≤5 | | | | | |
| 入口灰水比 | 1:10 | | | | | |
| 浓缩后灰水比 | 1:2 | | | | | |
| 溢流水含渣量（mg/L） | ≤300 | | | | | |
| 入口法兰 PN0.6 | DN350 | DN350 | DN400 | DN400 | DN450 | DN450 |
| 溢流口法兰 | PN0.6，DN500 | | | | | |
| 出浆口法兰 | PN0.6，DN200 | | | | | |
| $H_1$（mm） | 800 | 2000 | 1726 | 800 | 800 | 1000 |
| $H_2$（mm） | 6500 | 10050 | 7400 | 7400 | 7240 | 8000 |
| $H_3$（mm） | 2350 | 2350 | 2350 | 2500 | 2500 | 2500 |
| $H_4$（mm） | 250 | 300 | 300 | 350 | 350 | 350 |
| $L$（mm） | 9600 | 11600 | 13600 | 16600 | 19600 | 21600 |
| $L_1$（mm） | 2000 | 2500 | 2500 | 3000 | 3500 | 3500 |
| 浓缩机质量（t） | 42 | 56 | 65 | 82 | 135 | 155 |

需要说明的是，澄清池和缓冲水池的功能与高效浓缩机一样，可根据实际工程情况选择。缓冲水池外形及基础见图3-16。缓冲水池主要技术参数见表3-7。

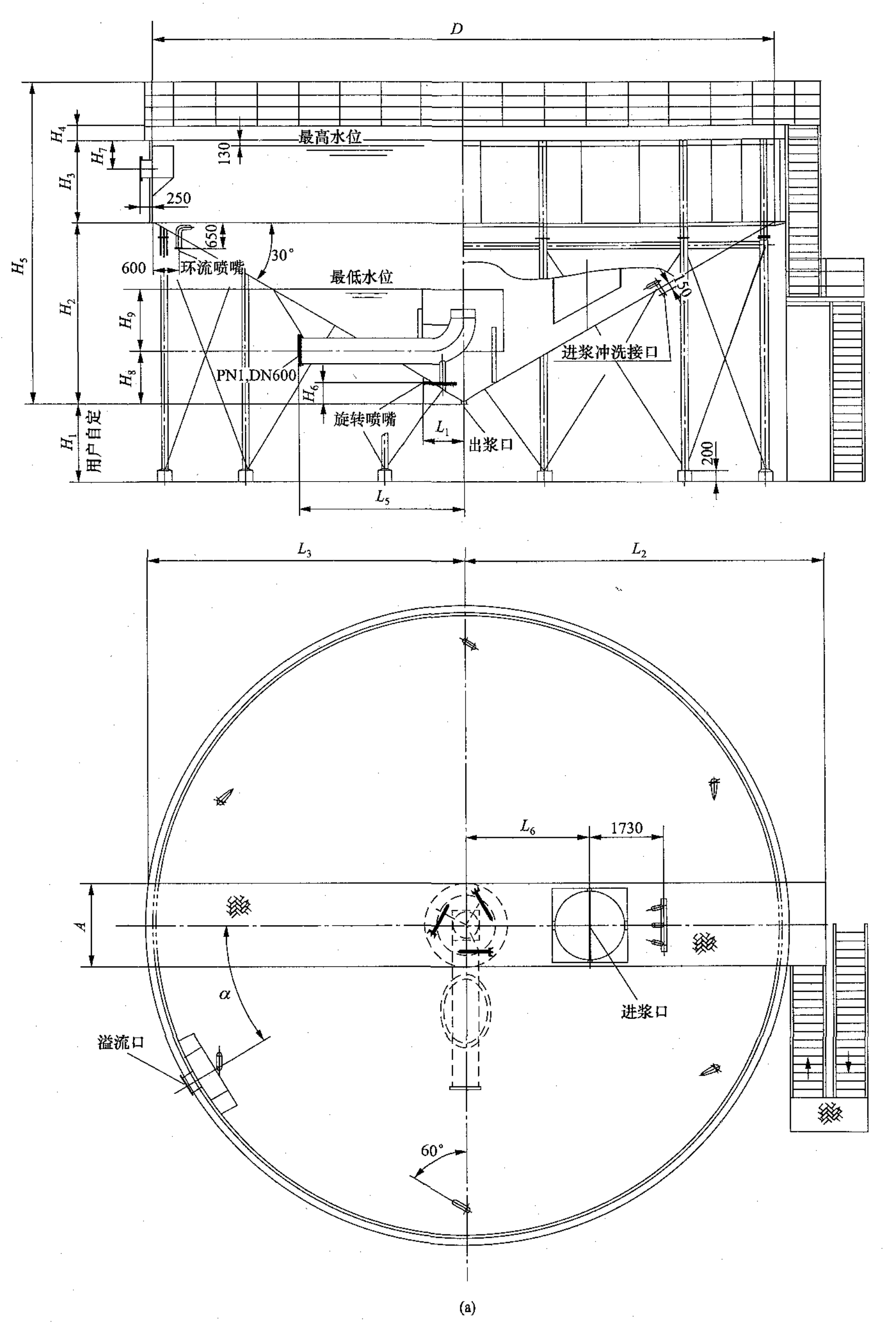



图3-16 缓冲水池外形及基础图（一）

（a）缓冲水池外形图

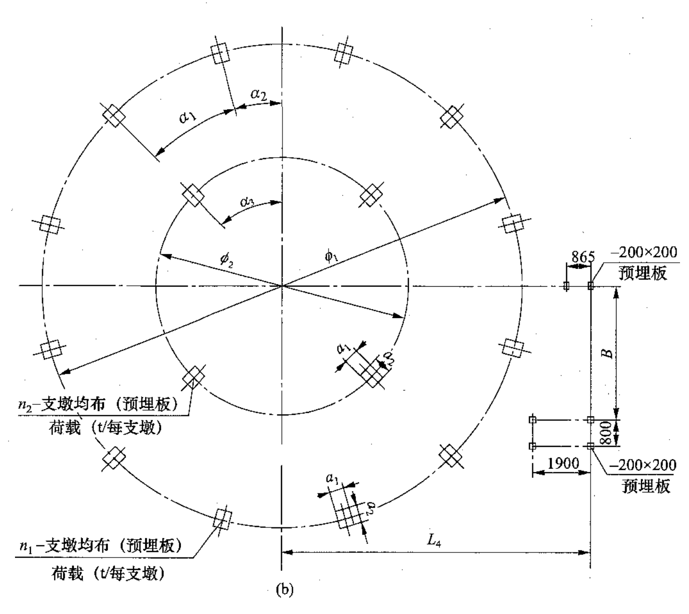



图 3-16　缓冲水池外形及基础图（二）

（b）缓冲水池基础图

**表 3-7　　缓冲水池主要技术参数**

| 仓体直径 $D$（m） | | 10 | 12 | 15 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|
| 有效容积（$m^3$） | | 270 | 400 | 580 | 1000 |
| 溢流水含渣量（mg/L） | | $<200$ | $<200$ | $<200$ | $<200$ |
| 喷水供水压力（MPa） | | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 喷嘴耗用水量（$m^3/h$） | | 35 | 50 | 80 | 90 |
| 喷嘴直径（mm） | | 8 | | | |
| 主要外形连接尺寸（mm） | $H_1$ | 用户自定 | | | |
| | $H_2$ | 2955 | 3665 | 4500 | 4100 |
| | $H_3$ | 2300 | 2700 | 2700 | 3200 |
| | $H_4$ | 254 | 254 | 304 | 364 |
| | $L_2 \times L_3$ | 6210×5200 | 7210×6200 | 8710×7700 | 9710×8700 |
| | $A \times H_5$ | 1600×6710 | 2000×7820 | 2000×8705 | 2000×8875 |
| | $H_6 \times L_1$ | 950×1300 | 700×1000 | 940×1300 | 1100×1480 |
| | $H_7$ | 560 | 600 | 640 | 690 |
| | $H_8 \times L_5$ | 1300×4000 | | | |
| | $H_9$ | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |
| | $L_6$ | 2800 | 3000 | 3500 | 4000 |
| | $\phi_1$ | 10010 | 12010 | 15010 | 17010 |
| | $\phi_2$ | — | — | — | 10000 |
| | $\alpha$ | 用户自定 | | | |

续表

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 主要外形连接尺寸（mm） | $\alpha_1$ | 22.5° | 15° | 15° | 15° |
| | $\alpha_2$ | 45° | 30° | 30° | 30° |
| | $\alpha_3$ | — | — | — | 45° |
| | $L_4 \times B$ | 7200×3855 | 8200×4510 | 9700×4952 | 10700×5047 |
| | $a_1 \times a_2$ | 400×550 | 400×550 | 450×600 | 550×700 |
| | $n_1$-支墩 | 8-支墩 | 12-支墩 | 12-支墩 | 12-支墩 |
| | $n_2$-支墩 | — | — | — | 4-支墩 |
| | 环流喷嘴法兰接口 | 4-PN1，DN80 | 4-PN1，DN80 | 6-PN1，DN100 | 6-PN1，DN100 |
| | 溢流口法兰接口 | PN0.6，DN450 | PN0.6，DN450 | PN0.6，DN500 | PN0.6，DN500 |
| | 底部旋转喷嘴接口 | 3-PN1，DN50 | 3-PN1，DN50 | 3-PN1，DN50 | 3-PN1，DN50 |
| | 进浆冲洗喷嘴接口 | PN1，DN80 | PN1，DN80 | PN1，DN80 | PN1，DN80 |
| | 出浆口法兰接口 | PN1，DN150 | PN1，DN150 | PN1，DN200 | PN1，DN200 |
| | 荷载（t/支墩） | 46 | 46 | 65 | 80 |

（三）机力冷却塔

1. 技术要求

（1）机力冷却塔宜为开式抽风逆流组合式机械通风冷却塔，配水系统为管式压力配水。

（2）机力冷却塔内所有塔芯和过流部件要满足非正常运行工况下进水温度为最高温度75℃的要求。

（3）机力冷却塔的配套风机应选择高效节能型冷却塔专用轴流风机（配套减速箱）。风机叶片为机翼型。风机安装于冷却塔的顶部，冷却塔风机与电动机应为直联传动。选用的风机性能参数（风量及风压等）应能满足冷却塔对风量和风压的要求。

（4）若电厂所处为寒冷地区，应从机力冷却塔的工艺设计、材料选择等方面采取合理有效的防冻措施，确保机力冷却塔可以在厂址地区冬季条件下安全地运行。

（5）由于机力冷却塔在潮湿、温热的条件下运行，故设备和材料应进行必要的防腐处理，以适应湿热的环境。

2. 设备参数

机力冷却塔由塔体、风筒、风机、导流装置、配水系统、收水器、淋水填料及填料承托架等组成。机力冷却塔外形见图3-17。

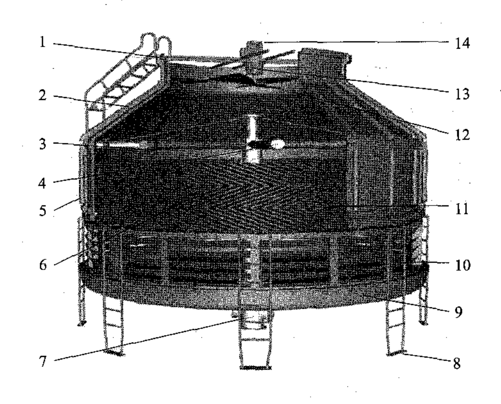



图3-17 机力冷却塔外形

1—电动机支架；2—上壳体；3—布水器；4—布水管；5—中壳体；6—进水管；7—进出水总成；8—塔脚；9—过水底盘；10—进风窗；11—淋水填料；12—风机；13—减速器；14—电动机

常用ZYY型机力冷却塔规格参数见表3-8。

**表3-8 常用ZYY型机力冷却塔规格参数**

| 机型 | 循环水量（m³/h） | | 外形尺寸（mm） | | 传动部 | | 塔体扬程（$mH_2O$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZYY-（D） | 环境湿球温度28℃ | 环境湿球温度27℃ | 高度$H$ | 外径（$\phi$）$D$ | 电动机功率（kW） | 风叶直径（$\phi$）$D$（mm） | |
| 10 | 10 | 11 | 1940 | 1170 | 0.18 | 700 | 2 |
| 15 | 15 | 18 | 2170 | 1380 | 0.55 | 800 | 2 |
| 20 | 20 | 23.5 | 2210 | 1580 | 0.75 | 800 | 2.1 |

续表

| 机型 | 循环水量（$m^3/h$） | | 外形尺寸（mm） | | 传动部 | | 塔体扬程（$mH_2O$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZYY-（D） | 环境湿球温度28℃ | 环境湿球温度27℃ | 高度 $H$ | 外径（$\phi$）$D$ | 电动机功率（kW） | 风叶直径（$\phi$）$D$（mm） | |
| 30 | 30 | 35 | 2400 | 2000 | 1.1 | 1000 | 2.3 |
| 50 | 50 | 58 | 2570 | 2175 | 1.5 | 1200 | 2.5 |
| 65 | 65 | 76 | 2650 | 2650 | 2.2 | 1500 | 2.8 |
| 80 | 80 | 93.5 | 2780 | 3050 | 2.2 | 1500 | 3.2 |
| 100 | 100 | 115 | 2790 | 3300 | 4 | 1800 | 3.5 |
| 125 | 125 | 145 | 3490 | 3770 | 4 | 1800 | 3.7 |
| 150 | 150 | 172 | 3690 | 3770 | 5.5 | 2400 | 4 |
| 175 | 175 | 205 | 3690 | 3770 | 7.5 | 2400 | 4 |
| 200 | 200 | 230 | 3850 | 4440 | 7.5 | 2400 | 4 |
| 225 | 200 | 230 | 3850 | 4440 | 7.5 | 2400 | 4.1 |
| 250 | 250 | 293 | 4340 | 5180 | 7.5 | 3000 | 4.4 |
| 300 | 300 | 345 | 4430 | 5580 | 11 | 3000 | 4.4 |
| 350 | 350 | 402.5 | 4430 | 5580 | 15 | 3400 | 4.4 |
| 400 | 400 | 460 | 4790 | 6600 | 15 | 3400 | 5.4 |
| 450 | 450 | 523 | 4790 | 6600 | 18.5 | 3600 | 5.4 |
| 500 | 500 | 582 | 5330 | 7600 | 18.5 | 3600 | 6.5 |
| 600 | 600 | 690 | 5745 | 7600 | 22 | 3600 | 6.5 |
| 700 | 700 | 805 | 5745 | 7600 | 22 | 4300 | 6.5 |
| 750 | 750 | 850 | 6220 | 8430 | 22 | 4300 | 7 |
| 800 | 800 | 920 | 6220 | 8430 | 22 | 4300 | 7 |
| 900 | 900 | 1032 | 6220 | 8430 | 30 | 4300 | 7.4 |

注 1. 设计工况为：环境湿球温度28℃/27℃。进水温度37℃，出水温度32℃。

2. $1mH_2O=9.806375\times10^3Pa$。

### （四）除灰水泵

目前，绝大多数供水系统均采用闭式循环系统，因此，泵大多采用耐磨杂质泵，其设备计算和选型参见本章第四节；国外供水系统也有开式系统，因此，供水泵选用清水泵，其选型计算方法同杂质泵。常见清水泵主要有IS型泵、S型泵和D型泵，其技术参数和规格见表3-9～表3-11；安装尺寸见图3-18～图3-22及表3-12～表3-16。

**表3-9　　IS型泵主要性能参数**

| 泵型号 | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$ | | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW） | | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | （$m^3/h$） | （L/s） | | | 轴功率 $P_e$ | 电动机功率 | | |
| IS100-65-315C | 1450 | 25.7<br>42.9<br>51.5 | 7.1<br>11.9<br>14.3 | 24.5<br>23<br>21.7 | 49<br>60<br>61 | 3.5<br>4.5<br>5 | 5.5 | 2<br>2<br>2.5 | 275 |
| IS125-100-200 | 2900 | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 57.5<br>50<br>44.5 | 67<br>81<br>80 | 28<br>33.6<br>36.4 | 45 | 4.5<br>4.5<br>5 | 216 |

续表

| 泵型号 | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$（$m^3/h$） | 流量 $Q$（L/s） | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW）轴功率 $P_e$ | 功率（kW）电动机功率 | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| IS125-100-200 | 1450 | 60<br>100<br>120 | 16.7<br>27.8<br>33.3 | 14.5<br>12.5<br>11 | 62<br>76<br>75 | 3.83<br>4.48<br>4.79 | 7.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | 216 |
| IS125-100-200A | 2900 | 112.2<br>187<br>224.4 | 31.2<br>52<br>62.3 | 50.3<br>44<br>39 | 66<br>80<br>78 | 23.3<br>28<br>30.6 | 37 | 4.5<br>4.5<br>5 | 205 |
| | 1450 | 56.1<br>93.5<br>112.2 | 15.6<br>26<br>31.2 | 12.6<br>11<br>9.7 | 60<br>74<br>74 | 3.21<br>3.8<br>4 | 5.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-200B | 2900 | 103.8<br>173<br>207.6 | 28.8<br>48.1<br>57.7 | 43<br>38<br>3.33 | 65<br>79<br>77 | 18.7<br>22.7<br>24.5 | 30 | 4.5<br>4.5<br>5 | 190 |
| | 1450 | 51.9<br>86.5<br>103.8 | 14.4<br>24.1<br>28.8 | 10.8<br>9.5<br>8.3 | 59<br>73<br>72 | 2.6<br>3.1<br>3.3 | 4 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-250 | 2900 | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 87<br>80<br>72 | 66<br>78<br>75 | 43<br>55.9<br>62.8 | 75 | 4.5<br>4.5<br>5 | 255 |
| | 1450 | 60<br>100<br>120 | 16.7<br>27.8<br>33.3 | 21.5<br>20<br>18.5 | 63<br>76<br>77 | 5.59<br>7.17<br>7.84 | 11 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-250A | 2900 | 112.2<br>187<br>224.4 | 31.2<br>52<br>62.3 | 76.1<br>70<br>63 | 65<br>76<br>73 | 35.8<br>51<br>52.8 | 55 | 4.5<br>4.5<br>5 | 250 |
| | 1450 | 56.1<br>93.5<br>112.2 | 15.6<br>26<br>31.2 | 19<br>17.5<br>15.7 | 61<br>75<br>75 | 4.76<br>5.95<br>6.4 | 7.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-250B | 2900 | 103.8<br>173<br>207.6 | 28.8<br>48.1<br>57.7 | 65.1<br>60<br>53.9 | 63<br>75<br>71 | 29.23<br>37.7<br>43 | 45 | 4.5<br>4.5<br>5 | 230 |
| | 1450 | 51.9<br>86.5<br>103.8 | 14.4<br>24.1<br>28.8 | 16.3<br>15<br>13.5 | 60<br>73<br>74 | 3.8<br>4.84<br>5.16 | 5.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-315 | 2900 | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 132.5<br>125<br>120 | 60<br>75<br>77 | 72.1<br>90.8<br>101.9 | 110 | 4<br>4.5<br>5 | 317 |
| | 1450 | 60<br>100<br>120 | 16.7<br>27.8<br>33.3 | 33.5<br>32<br>30.5 | 58<br>73<br>74 | 9.4<br>11.9<br>13.5 | 15 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-315A | 2900 | 114.6<br>191<br>229.2 | 31.8<br>53.1<br>63.7 | 121<br>114<br>109.4 | 59<br>74<br>75 | 64<br>80.2<br>91.1 | 110 | 4<br>4.5<br>5 | 306 |
| | 1450 | 57.3<br>95.5<br>114.6 | 15.92<br>26.53<br>31.83 | 30.5<br>28.5<br>27.8 | 57<br>72<br>72 | 8.35<br>10.3<br>12.1 | 15 | 2.5<br>2.5<br>3 | |
| IS125-100-315B | 2900 | 109<br>181.6<br>218 | 30.3<br>50.44<br>60.5 | 109.2<br>103<br>99 | 58<br>73<br>74 | 55.9<br>69.8<br>79.5 | 90 | 4<br>4.5<br>5 | 302 |
| | 1450 | 54.5<br>90.8<br>109 | 15.1<br>25.2<br>30.3 | 27.3<br>25.8<br>24.8 | 56<br>71<br>71 | 7.24<br>9<br>10.4 | 11 | 2.5<br>2.5<br>3 | |

续表

| 泵型号 | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$ |  | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW） |  | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |  | （$m^3/h$） | （L/s） |  |  | 轴功率 $P_e$ | 电动机功率 |  |  |
| IS125-100-315C | 2900 | 103<br>171.6<br>206 | 28.6<br>47.66<br>57.2 | 97.5<br>92<br>88.3 | 58<br>72<br>72 | 47.2<br>59.8<br>68.8 | 75 | 4<br>4.5<br>5 | 283<br>395 |
|  | 1450 | 51.5<br>85.8<br>103 | 14.3<br>23.83<br>28.6 | 24.4<br>23<br>22.1 | 55<br>70<br>70 | 6.23<br>7.68<br>8.86 | 11 | 2.5<br>2.5<br>3 |  |
| IS125-100-400 | 1450 | 60<br>100<br>120 | 16.7<br>27.8<br>33.3 | 52<br>50<br>48.5 | 53<br>65<br>67 | 16.1<br>21<br>23.6 | 30 | 2.5<br>2.5<br>3 | 375 |
| IS125-100-400A |  | 56.1<br>93.5<br>112.2 | 15.6<br>26<br>31.2 | 45.5<br>44<br>42.4 | 52<br>63<br>66 | 13.4<br>17.8<br>19.6 | 22 | 2.5<br>2.5<br>3 | 350 |
| IS125-100-400B |  | 52<br>86.5<br>104 | 14.4<br>24<br>28.8 | 39<br>38<br>36.4 | 51<br>61<br>65 | 10.8<br>14.7<br>15.9 | 18.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | 260 |
| IS150-125-250 |  | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 22.5<br>20<br>17.5 | 71<br>81<br>78 | 10.4<br>13.5<br>14.7 | 18.5 | 3<br>3<br>3.5 | 248 |
| IS150-125-250A |  | 112.2<br>187<br>224.4 | 31.2<br>52<br>62.3 | 19.7<br>17.5<br>15.3 | 70<br>80<br>77 | 8.6<br>11.1<br>12.15 | 15 | 3<br>3<br>3.5 | 230 |
| IS150-125-250B |  | 103.8<br>173<br>207.6 | 28.8<br>48.1<br>57.7 | 16.8<br>15<br>13.1 | 69<br>78<br>75 | 6.9<br>9.1<br>9.9 | 11 | 3<br>3<br>3.5 | 325 |
| IS150-125-315 |  | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 34<br>32<br>29 | 70<br>79<br>80 | 15.86<br>22.08<br>23.7 | 30 | 2.5<br>2.5<br>3 |  |
| IS150-125-315A |  | 112.2<br>187<br>224.4 | 31.2<br>52<br>62.3 | 30<br>28<br>25.4 | 78<br>77<br>78 | 11.8<br>18.53<br>20 | 22 | 2.5<br>2.5<br>3 | 310 |
| IS150-125-315B |  | 104<br>173<br>208 | 28.8<br>48.1<br>57.7 | 25.5<br>24<br>21.8 | 75<br>76<br>76 | 9.6<br>15<br>16.3 | 18.5 | 2.5<br>2.5<br>3 | 286 |
| IS150-125-400 |  | 120<br>200<br>240 | 33.3<br>55.6<br>66.7 | 53<br>50<br>46 | 62<br>75<br>74 | 27.9<br>36.3<br>40.6 | 45 | 2<br>2.8<br>3.5 | 400 |
| IS150-125-400A |  | 112.2<br>187<br>224.4 | 31.2<br>52<br>62.3 | 46.3<br>44<br>40.2 | 60<br>74<br>74 | 23.6<br>30.3<br>33 | 37 | 2<br>2.8<br>3.5 | 380 |
| IS150-125-400B |  | 104<br>173<br>208 | 28.8<br>48.1<br>57.7 | 39.6<br>38<br>32.7 | 59<br>72<br>70 | 19<br>24.9<br>26.5 | 30 | 2<br>2.8<br>3.5 | 353 |
| IS200-150-250 |  | 240<br>400<br>460 | 66.7<br>111.1<br>127.8 | 33<br>20<br>15.5 | 76<br>82<br>74 | 29.8<br>26.6<br>26.2 | 37 | 3<br>3.5<br>4 | 275 |
| IS200-150-250A |  | 224<br>374<br>430 | 62.2<br>103.8<br>119.4 | 28.9<br>17.5<br>13.6 | 74<br>80<br>82 | 23.8<br>22.3<br>22.1 | 30 | 3<br>3.5<br>4 | 262 |
| IS200-150-250B |  | 207.6<br>346<br>398 | 57.7<br>96.2<br>110.5 | 24.7<br>15<br>11.6 | 73<br>79<br>71 | 19.1<br>17.9<br>17.7 | 22 | 3<br>3.5<br>4 | 243 |

续表

| 泵型号 | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$ | | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW） | | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | （m³/h） | （L/s） | | | 轴功率 $P_e$ | 电动机功率 | | |
| IS200-150-315 | 1450 | 240<br>400<br>460 | 66.7<br>111.1<br>127.8 | 37<br>32<br>28.5 | 70<br>82<br>80 | 34.6<br>42.5<br>44.6 | 55 | 3<br>3.5<br>4 | 350 |
| IS200-150-315A | | 224<br>374<br>430 | 62.2<br>103.8<br>119.4 | 32.4<br>28<br>25 | 68<br>80<br>79 | 29.1<br>35.7<br>37.1 | 45 | 3<br>3.5<br>4 | 330 |
| IS200-150-315B | | 207.6<br>346<br>389 | 57.7<br>96.2<br>110.5 | 27.7<br>24<br>21.4 | 67<br>78<br>76 | 23.4<br>29<br>30.5 | 37 | 3<br>3.5<br>4 | 310 |
| IS200-150-400 | | 240<br>400<br>460 | 66.7<br>111.1<br>127.8 | 55<br>50<br>45 | 74<br>81<br>76 | 48.6<br>67.2<br>74.2 | 90 | 3<br>3.8<br>4.5 | 395 |
| IS200-150-400A | | 224<br>374<br>430 | 62.2<br>103.8<br>119.4 | 48.1<br>44<br>39.3 | 72<br>79<br>74 | 40.7<br>56.8<br>62.2 | 75 | 3<br>3.8<br>4.5 | 375 |
| IS200-150-400B | | 207.6<br>346<br>398 | 57.7<br>96.2<br>110.5 | 41.2<br>38<br>33.8 | 72<br>78<br>73 | 32.4<br>46<br>50.2 | 55 | 3<br>3.8<br>4.5 | 350 |

**表 3-10　　　　S型泵主要性能参数**

| 泵型号 | 转速 $n$(r/min) | 流量 $Q$ | | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW） | | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | （m³/h） | （L/s） | | | 配用功率 | 轴功率 $P_e$ | | | |
| 150S100 | 2950 | 160<br>180<br>210 | 44<br>50<br>58 | 105<br>100<br>95 | 66.3<br>66.2<br>77.7 | 90 | 62<br>72<br>70 | 4.7 | 276 | 170 |
| 150S78 | | 126<br>162<br>198 | 35<br>45<br>55 | 84<br>78<br>70 | 40<br>46.5<br>52.4 | 55 | 72<br>74<br>72 | 4.7 | 251 | 165 |
| 150S78A | | 111.6<br>144<br>180 | 31<br>40<br>50 | 67<br>62<br>55 | 30<br>33.8<br>38.5 | 45 | 68<br>72<br>70 | 4.7 | 223 | |
| 150S50 | | 130<br>170<br>220 | 36.2<br>47.2<br>61.2 | 52<br>47.6<br>35 | 25<br>27.6<br>31.3 | 45 | 73.9<br>79.8<br>67 | 4.7 | 200 | 155 |
| 150S50A | | 111.6<br>144<br>180 | 31<br>40<br>50 | 43.8<br>40<br>30 | 18.5<br>20.9<br>24.5 | 30 | 72<br>75<br>70 | 4.7 | 186 | |
| 200S110 | | 238<br>250<br>306 | 66<br>69<br>85 | 115<br>110<br>100 | 105<br>108<br>113 | 132 | 73<br>77<br>74 | 6 | 310 | 320 |
| 200S95 | | 180<br>234<br>288 | 50<br>65<br>80 | 100<br>93.5<br>82.5 | 71<br>81<br>86.4 | 90 | 69<br>73.5<br>75 | 5.2 | 282 | 309 |
| 200S63 | | 216<br>288<br>351 | 60<br>80<br>97.5 | 69<br>62.5<br>50 | 55<br>61.6<br>67.8 | 75 | 74<br>79.5<br>70.5 | 5.2 | 233 | 242 |
| 200S63A | | 180<br>270<br>324 | 50<br>75<br>90 | 54.5<br>46<br>37.5 | 39.5<br>46<br>47.8 | 55 | 67<br>76<br>72 | 6 | 218 | 241 |

续表

| 泵型号 | 转速 $n$(r/min) | 流量 $Q$ | | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 功率（kW） | | 必需汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | （m³/h） | （L/s） | | | 配用功率 | 轴功率 $P_e$ | | | |
| 200S631 | 2950 | 324 | 90 | 70 | 81.2 | 90 | 76 | 6 | 270 | 249 |
| 200S42 | | 216<br>288<br>342 | 60<br>80<br>95 | 48<br>42<br>35 | 35.8<br>40.1<br>42.4 | 55 | 79<br>82<br>77 | 6 | 204 | 195 |
| 250S120B | 1470 | 466 | 129.4 | 95 | 162.9 | 250 | 74 | 5.5 | 575 | 596 |
| 250S90 | | 400 | 111.1 | 90 | 132.5 | 160 | 74 | 5.3 | 520 | 565 |
| 250S75 | | 360 | 100 | 75 | 100.7 | 132 | 73 | 4.3 | 480 | 535 |
| 250S65 | | 360<br>486<br>612 | 100<br>135<br>170 | 71<br>65.1<br>56 | 99.5<br>112<br>126 | 132 | 70<br>76.5<br>74 | 4.3 | 460 | 528 |
| 250S65A | | 342<br>468<br>540 | 95<br>130<br>150 | 61<br>54<br>50 | 69<br>75<br>72 | 110 | 82.2<br>92<br>102 | 4.2 | 430 | |
| 250S39 | | 360<br>486<br>612 | 100<br>135<br>170 | 42.5<br>38.5<br>32.5 | 75<br>81<br>80 | 75 | 55.5<br>63<br>68 | 4.2 | 367 | 428 |
| 250S39A | | 324<br>468<br>576 | 90<br>130<br>160 | 35.5<br>30.5<br>25 | 74<br>80<br>71 | 55 | 42.4<br>48.6<br>51 | 4.2 | 338 | |
| 250S24 | | 360<br>486<br>576 | 100<br>135<br>160 | 27<br>23.5<br>19 | 80<br>86<br>82 | 45 | 33.1<br>36.2<br>36.4 | 4.2 | 296 | 420 |
| 250S24A | | 342<br>414<br>482 | 95<br>115<br>134 | 22.2<br>20.3<br>17.4 | 80<br>83<br>80 | 37 | 25.8<br>27.6<br>28.6 | 4.2 | 270 | |
| 250S14 | | 360<br>486<br>576 | 100<br>135<br>160 | 17.5<br>14<br>11 | 79<br>82<br>76 | 30 | 22.7<br>22.6<br>22.1 | 4.2 | 240 | 405 |
| 250S14A | | 320<br>432<br>504 | 89<br>120<br>140 | 13.3<br>11<br>8.6 | 78<br>82<br>75 | 22 | 15.4<br>15.8<br>15.8 | 4.2 | 224 | |
| 300S96B | | 450 | 125 | 80 | 74 | 160 | 132.5 | 5.3 | 510 | 837 |
| 300S90 | | 590<br>792<br>936 | 164<br>220<br>260 | 98<br>90<br>82 | 74<br>77.5<br>75 | 315 | 213<br>250<br>279 | 5.5 | 540 | 857 |
| 300S90A | | 576<br>756<br>918 | 160<br>210<br>255 | 86<br>78<br>70 | 71<br>74<br>71 | 280 | 190<br>217<br>246 | 5.3 | 510 | |
| 300S90B | | 540<br>720<br>900 | 150<br>200<br>250 | 72<br>67<br>57 | 70<br>73<br>70 | 230 | 151<br>180<br>200 | 5 | 475 | |
| 300S58 | | 576<br>792<br>972 | 160<br>220<br>270 | 65<br>58<br>50 | 80<br>83.5<br>79 | 220 | 127.5<br>150<br>167.5 | 5.5 | 435 | 773 |
| 300S58A | | 530<br>720<br>893 | 147<br>200<br>248 | 55<br>49<br>42 | 80<br>83<br>78 | 160 | 99.2<br>115.6<br>131 | 5 | 402 | |
| 300S58B | | 504<br>684<br>835 | 140<br>190<br>232 | 47.2<br>43<br>37 | 79<br>82<br>78 | 132 | 82.5<br>97.7<br>108 | 5.3 | 378 | |

续表

| 泵型号 | 转速<br>$n$(r/min) | 流量 $Q$ | | 扬程<br>$H$（m） | 效率<br>$\eta$（%） | 功率（kW） | | 必需汽蚀余量<br>$NPSH_r$<br>（m） | 叶轮直径<br>（mm） | 质量<br>（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | （$m^3$/h） | （L/s） | | | 配用功率 | 轴功率<br>$P_e$ | | | |
| 300S32 | 1470 | 612<br>792<br>900 | 170<br>220<br>250 | 36.4<br>32<br>29.5 | 80<br>83.5<br>82.2 | 75.5<br>83.5<br>94.5 | 110 | 5.5 | 352 | 709 |
| 300S32A | | 551<br>720<br>810 | 153<br>200<br>225 | 31<br>26<br>24 | 79<br>82.5<br>80.5 | 59<br>67<br>66 | 75 | 5 | 322 | |
| 300S19 | | 612<br>792<br>935 | 170<br>220<br>260 | 23<br>19.4<br>14 | 80<br>82<br>75 | 47.9<br>51<br>47.6 | 55 | 5.5 | 290 | 478 |
| 300S19A | | 540<br>720<br>900 | 140<br>200<br>250 | 20<br>16<br>11.5 | 71<br>82<br>75 | 34.8<br>38.3<br>37.6 | 45 | 5 | 265 | |
| 300S12 | | 612<br>792<br>900 | 170<br>220<br>250 | 14.5<br>12<br>10 | 80<br>81<br>74 | 30.2<br>32<br>33.1 | 45 | 5.5 | 248 | 472 |
| 300S12A | | 522<br>685<br>792 | 145<br>190<br>220 | 11.8<br>10<br>8.7 | 72<br>77<br>74 | 23.3<br>24.4<br>25.5 | 30 | 5.3 | 225 | 471 |
| 300S110 | | 432 | 120 | 110 | 74 | 174.8 | 250 | 5.5 | 575 | 900 |
| 300S115A | | 414 | 115 | 106 | 80 | 159.3 | 225 | | 575 | 900 |
| 300S115B | | 479 | 133 | 100 | 75 | 173.9 | 200 | | 540 | 883 |
| 300S125I | | 423<br>475<br>563 | 118<br>132<br>156 | 113<br>113<br>110 | 63<br>65<br>70 | 207<br>225<br>241 | 250 | | 590 | 1238<br>1580 |
| 300S125II | | 440 | 122.2 | 100 | 65 | 184.3 | 225 | | 540 | 1226 |
| 350S125 | | 850<br>1250<br>1660 | 236<br>347<br>461 | 140<br>125<br>100 | 70<br>78<br>72.5 | 462<br>545<br>625 | 630 | 6.6 | 665 | 1580 |
| 350S125A | | 803<br>1180<br>1570 | 223<br>328<br>436 | 125<br>112<br>90 | 70<br>75<br>67 | 392<br>481<br>575 | 630 | 6.5 | 620 | 1580 |
| 350S125B | | 745<br>1100<br>1460 | 207<br>305<br>405 | 108<br>96<br>77 | 69<br>74<br>70 | 317<br>388<br>439 | 500 | | 575 | |
| 350S85 | 1480 | 1265 | 350 | 85 | 75 | 389 | 450 | 6 | 518 | 1200 |
| 350S75I | 1470 | 1260 | 350 | 85 | 78 | 373.9 | 400 | 6.6 | 530 | 1232 |
| 350S75J | | 1450 | 402.7 | 55 | 78 | 278.4 | 315 | | 465 | 1178 |
| 350S75 | | 972<br>1260<br>1440 | 270<br>350<br>400 | 80<br>75<br>65 | 77<br>80<br>79 | 275<br>322<br>323 | 355 | | 500 | 1200 |
| 350S75A | | 900<br>1170<br>1332 | 250<br>325<br>370 | 70<br>65<br>56 | 75<br>79<br>77 | 228.5<br>262<br>263.9 | 280 | 6.5 | 465 | |
| 350S75B | | 828<br>1080<br>1224 | 230<br>300<br>340 | 59<br>55<br>47.5 | 75<br>78<br>77 | 182.3<br>207.2<br>211 | 250 | | 428 | |
| 350S44 | | 972<br>1260<br>1480 | 270<br>350<br>410 | 50<br>43.8<br>37 | 81<br>84<br>79 | 164<br>179<br>188 | 220 | 6.6 | 410 | 1105 |

续表

<table>
<tr><th rowspan="2">泵型号</th><th rowspan="2">转速<br>$n$(r/min)</th><th colspan="2">流量 $Q$</th><th rowspan="2">扬程<br>$H$（m）</th><th rowspan="2">效率<br>$\eta$（%）</th><th colspan="2">功率（kW）</th><th rowspan="2">必需汽蚀<br>余量<br>$NPSH_r$<br>（m）</th><th rowspan="2">叶轮<br>直径<br>（mm）</th><th rowspan="2">质量<br>（kg）</th></tr>
<tr><th>（m³/h）</th><th>（L/s）</th><th>配用功率</th><th>轴功率<br>$P_e$</th></tr>
<tr><td>350S44A</td><td rowspan="6">1470</td><td>864<br>1116<br>1332</td><td>240<br>310<br>370</td><td>41<br>36<br>30</td><td>80<br>84<br>80</td><td>121<br>130<br>136</td><td>160</td><td>6.5</td><td>380</td><td>1105</td></tr>
<tr><td>350S26</td><td>972<br>1260<br>1440</td><td>270<br>350<br>400</td><td>32<br>26<br>22</td><td>85<br>88<br>82</td><td>99.7<br>102<br>105</td><td>132</td><td>6.6</td><td>350</td><td rowspan="2">878</td></tr>
<tr><td>350S26A</td><td>864<br>1116<br>1296</td><td>240<br>310<br>360</td><td>26<br>21.5<br>16.5</td><td>80<br>85<br>73</td><td>76.5<br>77<br>80</td><td>110</td><td>6.5</td><td>326</td></tr>
<tr><td>350S16</td><td>972<br>1260<br>1440</td><td>270<br>350<br>400</td><td>20<br>16.2<br>134</td><td>80<br>81<br>74</td><td>66.2<br>68.5<br>71</td><td>75</td><td>6.6</td><td>290</td><td rowspan="2">760</td></tr>
<tr><td>350S16A</td><td>864<br>1044<br>1260</td><td>240<br>290<br>350</td><td>16<br>13.4<br>10</td><td>74<br>78<br>70</td><td>50.8<br>48.8<br>49</td><td>55</td><td rowspan="2">6.5</td><td>265</td></tr>
<tr><td>400S75</td><td>1283<br>1450<br>1501</td><td>356<br>403<br>417</td><td>76.3<br>70<br>50</td><td>76.2<br>83<br>58</td><td>350<br>366<br>350</td><td>400</td><td>516</td><td>1225</td></tr>
<tr><td>500S98</td><td rowspan="5">970</td><td>1620<br>2020<br>2340</td><td>450<br>561<br>650</td><td>114<br>98<br>79</td><td>78<br>79.5<br>74</td><td>644.8<br>678<br>680.3</td><td>800</td><td rowspan="5">6</td><td>880</td><td rowspan="3">4320</td></tr>
<tr><td>500S98A</td><td>1500<br>1872<br>2170</td><td>417<br>520<br>603</td><td>96<br>83<br>67</td><td>77<br>78.5<br>73</td><td>509.3<br>540<br>542.5</td><td>630</td><td>835</td></tr>
<tr><td>500S98B</td><td>1400<br>1746<br>2020</td><td>389<br>485<br>561</td><td>86<br>74<br>59</td><td>76<br>78<br>75</td><td>431.4<br>452<br>432.8</td><td>560</td><td>770</td></tr>
<tr><td>500S59</td><td>1620<br>2020<br>2340</td><td>450<br>561<br>650</td><td>68<br>59<br>47</td><td>79<br>83<br>80</td><td>379.7<br>391<br>374.5</td><td>450</td><td>682</td><td rowspan="2">2747</td></tr>
<tr><td>500S59A</td><td>1500<br>1872<br>2170</td><td>417<br>520<br>603</td><td>57<br>49<br>39</td><td>74<br>75<br>72</td><td>315<br>333<br>320</td><td>400</td><td>640</td></tr>
</table>

**表 3-11　　D 型泵主要性能参数**

<table>
<tr><th>泵型号</th><th>级数</th><th>流量 $Q$<br>（m³/h）</th><th>扬程 $H$<br>（m）</th><th>转速 $n$<br>（r/min）</th><th>轴功率 $P_e$<br>（kW）</th><th>电动机型号，<br>功率 $P$<br>（kW）</th><th>效率 $\eta$<br>（%）</th><th>汽蚀余量<br>$NPSH_r$<br>（m）</th><th>叶轮直径 $D$<br>（mm）</th><th>质量<br>（kg）</th></tr>
<tr><td rowspan="4">80D（F）12</td><td>2</td><td>21.6<br>34.6<br>39.6</td><td>28.8<br>22.8<br>19.0</td><td rowspan="4">2950</td><td>2.46<br>2.86<br>2.85</td><td>Y112M-2/4</td><td>69<br>75<br>72</td><td>2.0<br>2.5<br>3.0</td><td rowspan="4">110</td><td>105</td></tr>
<tr><td>3</td><td>21.6<br>34.6<br>39.6</td><td>43.2<br>34.2<br>28.5</td><td>3.68<br>4.26<br>4.27</td><td>Y132S1-2/7.5</td><td>69<br>75<br>72</td><td>2.0<br>2.5<br>3.0</td><td>121</td></tr>
<tr><td>4</td><td>21.6<br>34.6<br>39.6</td><td>57.6<br>45.6<br>38.0</td><td>4.91<br>5.73<br>5.69</td><td>Y132S2-2/7.5</td><td>69<br>75<br>72</td><td>2.0<br>2.5<br>3.0</td><td>137</td></tr>
<tr><td>5</td><td>21.6<br>34.6<br>39.6</td><td>72.0<br>57.0<br>47.1</td><td>6.14<br>7.16<br>7.05</td><td>Y160M2-2/15</td><td>69<br>75<br>72</td><td>2.0<br>2.5<br>3.0</td><td>153</td></tr>
</table>

续表

| 泵型号 | 级数 | 流量 $Q$ ($m^3/h$) | 扬程 $H$ (m) | 转速 $n$ (r/min) | 轴功率 $P_e$ (kW) | 电动机型号，功率 $P$ (kW) | 效率 $\eta$ (%) | 汽蚀余量 $NPSH_r$ (m) | 叶轮直径 $D$ (mm) | 质量 (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80D（F）12 | 6 | 21.6<br>34.6<br>39.6 | 96.4<br>68.4<br>60.0 | 2950 | 7.37<br>8.59<br>8.99 | Y160M2-2/15 | 69<br>75<br>72 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | 110 | 169 |
| | 7 | 21.6<br>34.6<br>39.6 | 100.8<br>79.8<br>66.0 | | 8.59<br>10.03<br>9.89 | Y160L-2/18.5 | 69<br>75<br>72 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 185 |
| | 8 | 21.6<br>34.6<br>39.6 | 115.2<br>91<br>79.0 | | 9.82<br>11.46<br>11.83 | Y160L-2/18.5 | 69<br>75<br>72 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 201 |
| | 9 | 21.6<br>34.6<br>39.6 | 129.6<br>102.6<br>84.7 | | 11.05<br>12.89<br>12.69 | Y160L-2/18.5 | 69<br>75<br>72 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 217 |
| 80D（F）30 | 3 | 23<br>43<br>50 | 102.6<br>90<br>79.8 | | 11.79<br>15.99<br>16.59 | Y180M-2/22 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | 160 | 240 |
| | 4 | 23<br>43<br>50 | 136.8<br>120<br>106.4 | | 15.72<br>21.29<br>22.12 | Y200L1-2/30 | 54.5<br>66.0<br>65.6 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 290 |
| | 5 | 23<br>43<br>50 | 171<br>150<br>133 | | 19.65<br>26.61<br>27.65 | Y200L1-2/37 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 340 |
| | 6 | 23<br>43<br>50 | 205.2<br>180<br>159.6 | | 23.58<br>31.94<br>33.18 | Y200L1-2/37 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 390 |
| | 7 | 23<br>43<br>50 | 239.4<br>210<br>186.2 | | 27.60<br>37.26<br>38.70 | Y225M-2/45 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 440 |
| | 8 | 23<br>43<br>50 | 273.6<br>240<br>212.8 | | 31.44<br>42.58<br>44.24 | Y250M-2/55 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 500 |
| | 9 | 23<br>43<br>50 | 307.8<br>270<br>239.4 | | 35.38<br>47.91<br>49.77 | Y250M-2/55 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.0<br>2.5<br>3.0 | | 550 |
| | 10 | 23<br>43<br>50 | 342<br>300<br>266.0 | | 39.23<br>53.23<br>55.30 | Y280S-2/75 | 54.5<br>66.0<br>65.5 | 2.5<br>2.5<br>3.0 | | 600 |
| 100D（F）16 | 2 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 36.8<br>31.0<br>20.4 | | 5.31<br>6<br>6.06 | Y132S2-2/7.5 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | 128 | 145 |
| | 3 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 55.2<br>46.5<br>30.6 | | 7.96<br>9<br>9.09 | Y160M1-2/11 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | | 163 |
| | 4 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 73.6<br>62.0<br>40.8 | | 10.61<br>12<br>12.12 | Y160M2-2/15 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | | 181 |
| | 5 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 92.0<br>77.5<br>51.0 | | 13.27<br>15<br>15.15 | Y180M-2/22 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | | 199 |
| | 6 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 110.4<br>93.0<br>61.2 | | 15.96<br>18<br>18.18 | Y180M-2/22 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | | 217 |

续表

| 泵型号 | 级数 | 流量 $Q$ （$m^3/h$） | 扬程 $H$ （m） | 转速 $n$ （r/min） | 轴功率 $P_e$ （kW） | 电动机型号，功率 $P$ （kW） | 效率 $\eta$ （%） | 汽蚀余量 $NPSH_r$ （m） | 叶轮直径 $D$ （mm） | 质量 （kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 7 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 128.8<br>105.8<br>71.4 |  | 18.58<br>20.47<br>21.21 | Y200L1-2/30 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 |  | 235 |
| 100D（F）16 | 8 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 147.2<br>124.0<br>81.6 |  | 21.23<br>24<br>24.24 | Y200L1-2/30 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 | 128 | 253 |
|  | 9 | 37.6<br>54.0<br>72.0 | 165.6<br>139.5<br>91.8 |  | 23.88<br>27<br>27.27 | Y200L2-2/37 | 71<br>76<br>66 | 2.6<br>3.1<br>3.7 |  | 271 |
|  | 2 | 54<br>85<br>97 | 100<br>90<br>80 |  | 22.97<br>29.55<br>29.35 | Y200L2-2/37 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 380 |
|  | 3 | 54<br>85<br>97 | 150<br>135<br>120 |  | 34.47<br>44.33<br>44.03 | Y250M-2/55 | 64<br>70.5<br>72 | 35<br>4.0<br>4.8 |  | 460 |
|  | 4 | 54<br>85<br>97 | 200<br>180<br>160 |  | 45.96<br>59.1<br>58.7 | Y280S-2/75 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 540 |
|  | 5 | 54<br>85<br>97 | 250<br>225<br>200 |  | 57.44<br>73.88<br>73.38 | Y280M-2/90 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 620 |
| 100D（F）45 | 6 | 54<br>85<br>97 | 300<br>270<br>240 |  | 68.93<br>88.65<br>88.05 | Y315S1-2/110 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 | 200 | 700 |
|  | 7 | 54<br>85<br>97 | 350<br>315<br>280 | 2950 | 80.42<br>103.42<br>102.73 | Y315M1-2/132 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 780 |
|  | 8 | 54<br>85<br>97 | 400<br>360<br>320 |  | 91.91<br>118.20<br>117.40 | Y315M1-2/160 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 860 |
|  | 9 | 54<br>85<br>97 | 450<br>405<br>360 |  | 103.40<br>132.98<br>132.08 | Y315M2-2/160 | 64<br>70.5<br>72 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 940 |
|  | 2 | 72.0<br>101<br>119 | 51.20<br>43.00<br>35.00 |  | 14.24<br>15.26<br>15.22 | Y180M-2/22 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 330 |
|  | 3 | 72.0<br>101<br>119 | 76.80<br>64.58<br>52.50 |  | 21.36<br>22.92<br>22.83 | Y200L1-2/30 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 400 |
|  | 4 | 72.0<br>101<br>119 | 102.4<br>86.0<br>70.0 |  | 28.48<br>30.52<br>30.66 | Y200L2-2/37 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 470 |
| 125D（F）25 | 5 | 72.0<br>101<br>119 | 128<br>107.5<br>87.5 |  | 35.60<br>38.15<br>38.32 | Y225M-2/45 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>4.8 | 156 | 540 |
|  | 6 | 72.0<br>101<br>119 | 153.6<br>129.0<br>105.0 |  | 42.72<br>45.78<br>45.98 | Y225M-2/55 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>4.8 |  | 610 |
|  | 7 | 72.0<br>101<br>119 | 179.2<br>150.5<br>122.5 |  | 49.84<br>53.41<br>53.65 | Y280S-2/75 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>5.0 |  | 680 |

续表

| 泵型号 | 级数 | 流量 $Q$ （m³/h） | 扬程 $H$ （m） | 转速 $n$ （r/min） | 轴功率 $P_e$ （kW） | 电动机型号，功率 $P$ （kW） | 效率 $\eta$ （%） | 汽蚀余量 $NPSH_r$ （m） | 叶轮直径 $D$ （mm） | 质量 （kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 125D（F）25 | 8 | 72.0<br>101<br>119 | 204.8<br>172.0<br>140.0 | 2950 | 56.96<br>61.04<br>61.31 | Y280S-2/75 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>5.0 | 156 | 750 |
| | 9 | 72.0<br>101<br>119 | 230.4<br>193.5<br>157.5 | | 64.08<br>68.67<br>68.98 | Y280M-2/90 | 70.5<br>77.5<br>74.0 | 3.5<br>4.0<br>5.0 | | 820 |
| 150D（F）30 | 3 | 119<br>155<br>190 | 93.0<br>87.0<br>79.5 | 1480 | 40.73<br>47.69<br>54.85 | Y280S-4/75 | 74<br>77<br>75 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | 305 | 575 |
| | 4 | 119<br>155<br>190 | 124<br>116<br>106 | | 56.60<br>66.62<br>76.18 | Y280M-4/90 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 660 |
| | 5 | 119<br>155<br>190 | 155<br>145<br>133 | | 70.75<br>83.27<br>95.58 | Y315S-4/110<br>JR114-4/125 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 750 |
| | 6 | 119<br>155<br>190 | 186<br>174<br>159 | | 84.90<br>99.93<br>114.27 | Y315M-4/132<br>JR116-4/125 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 840 |
| | 7 | 119<br>155<br>190 | 217<br>203<br>186 | | 99.05<br>116.58<br>133.67 | Y315M-4/132<br>JR116-4/125 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 9330 |
| | 8 | 119<br>155<br>190 | 248<br>232<br>212 | | 113.20<br>133.24<br>152.35 | Y355M-4/185<br>JR117-4/180 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 1020 |
| | 9 | 119<br>155<br>190 | 279<br>261<br>239 | | 127.35<br>149.89<br>171.76 | Y355M-4/185<br>JR117-4/180 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 1110 |
| | 10 | 119<br>155<br>190 | 310<br>290<br>265 | | 141.50<br>166.55<br>190.44 | Y355M-4/220<br>JR126-4/225 | 71<br>73.5<br>72 | 2.3<br>2.7<br>3.0 | | 1200 |
| 200（F）D43 | 2 | 190<br>288<br>346 | 90.6<br>81.6<br>74.0 | | 64.22<br>80.0<br>89.39 | Y315S-4/110 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | 360 | 750 |
| | 3 | 190<br>288<br>346 | 135.9<br>122.4<br>111.0 | | 96.33<br>120<br>134.09 | Y315L1-4/160 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 875 |
| | 4 | 190<br>288<br>346 | 181.2<br>163.2<br>148.0 | | 128.44<br>160.0<br>178.79 | Y355M-4/220<br>JR127-4/230 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 1000 |
| | 5 | 190<br>288<br>346 | 226.5<br>204.0<br>185.0 | | 160.54<br>200.0<br>223.49 | Y355L-4/315<br>JR136-4/300<br>（3000V） | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 1130 |
| | 6 | 190<br>288<br>346 | 271.8<br>244.8<br>222.0 | | 192.65<br>240.0<br>268.18 | Y355L-4/315<br>JR136-4/300<br>（3000V） | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 1260 |
| | 7 | 190<br>288<br>346 | 317.1<br>285.6<br>259.0 | | 226.1<br>280.0<br>310.1 | Y400-4/350<br>JR137-4/350 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 1420 |
| | 8 | 190<br>288<br>346 | 362.4<br>326.4<br>296.0 | | 258.4<br>320.0<br>357.58 | Y400-4/400<br>JR138-4/410 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | | 1580 |

续表

| 泵型号 | 级数 | 流量 $Q$（$m^3/h$） | 扬程 $H$（m） | 转速 $n$（r/min） | 轴功率 $P_e$（kW） | 电动机型号，功率 $P$（kW） | 效率 $\eta$（%） | 汽蚀余量 $NPSH_r$（m） | 叶轮直径 $D$（mm） | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 200D（F）43 | 9 | 190<br>288<br>346 | 407.7<br>367.2<br>333.0 | 1480 | 288.98<br>360.0<br>402.28 | Y400-4/450<br>JR148-4/440 | 73<br>80<br>78 | 3.0<br>4.0<br>4.5 | 360 | 1740 |
| 250D（F）43 | 2 | 360<br>450<br>540 | 95<br>86<br>80 | 1480 | 133.05<br>136.87<br>154.80 | Y355M-4/185 | 70<br>77<br>76 | 4.2<br>4.8<br>5.8 | 620 | 1135 |
| | 3 | 360<br>450<br>540 | 138<br>129<br>123 | | 193.28<br>205.31<br>238 | Y355M-4/280 | 70<br>77<br>76 | 4.2<br>4.8<br>5.8 | | 1385 |
| | 4 | 360<br>450<br>540 | 181<br>172<br>166 | 1490 | 253.50<br>273.75<br>321.21 | Y450-4/355（10kV） | 70<br>77<br>76 | 4.2<br>4.8<br>5.8 | | 1635 |
| | 5 | 360<br>450<br>540 | 224<br>215<br>209 | | 313.73<br>342.18<br>404.41 | Y450-4/450（10kV） | 70<br>77<br>76 | 4.2<br>4.8<br>5.8 | | 1885 |
| | 6 | 360<br>450<br>540 | 267<br>258<br>252 | | 373.95<br>410.63<br>487.62 | Y450-4/500（10kV） | 70<br>77<br>76 | 4.2<br>4.8<br>5.8 | | 2135 |

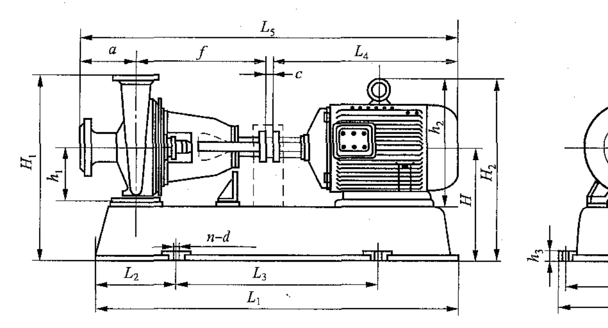



图 3-18 IS 型泵安装尺寸图

**表 3-12** **IS 型 泵 安 装 尺 寸**

<table>
<tr><th rowspan="2">产品型号</th><th rowspan="2">机座号/功率（kW）</th><th colspan="19">外形安装尺寸（mm）</th></tr>
<tr><th>$A$</th><th>$L_1$</th><th>$L_2$</th><th>$L_3$</th><th>$L_4$</th><th>$a$</th><th>$f$</th><th>$c$</th><th>$L_5$</th><th>$B_1$</th><th>$B_2$</th><th>$B_3$</th><th>$h_1$</th><th>$h_2$</th><th>$H$</th><th>$H_1$</th><th>$H_2$</th><th>$n$-$d$</th><th>$h_3$</th></tr>
<tr><td rowspan="4">IS50-32-125</td><td>80-4/0.55</td><td rowspan="4">70</td><td rowspan="3">715</td><td rowspan="3">150</td><td rowspan="3">440</td><td rowspan="2">295</td><td rowspan="4">80</td><td rowspan="4">380</td><td rowspan="4">2</td><td rowspan="2">757</td><td rowspan="2">150</td><td rowspan="3">320</td><td rowspan="3">360</td><td rowspan="4">112</td><td rowspan="2">170</td><td rowspan="4">192</td><td rowspan="4">332</td><td rowspan="2">282</td><td rowspan="4">4-$\phi$18.2</td><td rowspan="4">20</td></tr>
<tr><td>80-2/1.1</td></tr>
<tr><td>90S-2/1.5</td><td>320</td><td>782</td><td rowspan="2">155</td><td rowspan="2">190</td><td rowspan="2">292</td></tr>
<tr><td>90L-2/2.2</td><td>790</td><td>170</td><td>500</td><td>345</td><td>807</td><td>350</td><td>390</td></tr>
<tr><td rowspan="4">IS50-32-160</td><td>80-4/0.55</td><td rowspan="4">70</td><td rowspan="2">700</td><td rowspan="2">150</td><td rowspan="2">440</td><td>295</td><td rowspan="4">80</td><td rowspan="4">380</td><td rowspan="4">2</td><td>757</td><td>150</td><td rowspan="2">320</td><td rowspan="2">360</td><td rowspan="4">132</td><td>170</td><td rowspan="4">212</td><td rowspan="4">372</td><td>302</td><td rowspan="4">4-$\phi$18.5</td><td rowspan="4">20</td></tr>
<tr><td>90S-2/1.5</td><td>320</td><td>782</td><td rowspan="2">155</td><td rowspan="2">190</td><td rowspan="2">302</td></tr>
<tr><td>90L-2/2.2</td><td rowspan="2">790</td><td rowspan="2">170</td><td rowspan="2">500</td><td>345</td><td>807</td><td rowspan="2">350</td><td rowspan="2">390</td></tr>
<tr><td>100L-2/3</td><td>390</td><td>852</td><td>180</td><td>245</td><td>357</td></tr>
</table>

续表

| 产品型号 | 机座号/功率（kW） | 外形安装尺寸（mm） | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $A$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $a$ | $f$ | $c$ | $L_5$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $h_1$ | $h_2$ | $H$ | $H_1$ | $H_2$ | $n$-$d$ | $h_3$ |
| IS50-32-200 | 80-4/0.75 | 70 | 700 | 150 | 440 | 295 | 80 | 380 | 2 | 757 | 150 | 320 | 360 | 160 | 170 | 240 | 420 | 330 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 100L-2/3 | | 780 | 170 | 500 | 390 | | | | 852 | 180 | 350 | 390 | | 245 | | | 385 | | |
| | 112M-2/4 | | | | | 410 | | | | 872 | 190 | | | | 265 | | | 393 | | |
| | 132S-2/5.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 947 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 423 | | |
| IS50-32-250 | 90S-4/11 | 85 | 900 | 190 | 560 | 325 | 100 | 485 | 2 | 912 | 155 | 380 | 430 | 180 | 190 | 260 | 485 | 360 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 90L-4/1.5 | | | | | 350 | | | | 937 | | | | | | | | | | |
| | 132S-2/7.5 | | 1010 | 210 | 640 | 490 | | | | 1077 | 210 | 440 | 490 | | 315 | | | 443 | | |
| | 160M-2/11 | | 1147 | 225 | 700 | 615 | | | | 1202 | 255 | 430 | 480 | | 385 | | | 505 | 4-ϕ24 | |
| IS65-50-125 | 80-4/0.55 | 70 | 715 | 150 | 440 | 295 | 80 | 380 | 2 | 751 | 150 | 320 | 360 | 112 | 170 | 192 | 332 | 282 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 90S-2/1.5 | | | | | 320 | | | | 782 | 155 | | | | 190 | | | 292 | | |
| | 90L-2/2.2 | | 790 | 170 | 500 | 345 | | | | 807 | | 350 | 390 | | | | | | | |
| | 100L-2/3 | | | | | 390 | | | | 852 | 180 | | | | 245 | | | 337 | | |
| IS65-50-160 | 80-4/0.75 | 70 | 700 | 150 | 440 | 295 | 80 | 380 | 2 | 757 | 150 | 320 | 360 | 132 | 170 | 212 | 372 | 302 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 100L-2/3 | | 790 | 170 | 500 | 390 | | | | 852 | 180 | 350 | 390 | | 245 | | | 357 | | |
| | 112M-2/4 | | | | | 410 | | | | 872 | 190 | | | | 265 | | | 365 | | |
| | 132S-2/5.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 847 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 390 | 4-ϕ24 | |
| IS65-40-200 | 80-4/0.75 | 70 | 780 | 170 | 500 | 295 | 100 | 380 | 2 | 777 | 150 | 350 | 390 | 160 | 170 | 240 | 420 | 330 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 90L-4/1.1 | | | | | 320 | | | | 802 | 155 | | | | 190 | | | 340 | | |
| | 112M-2/4 | | | | | 410 | | | | 892 | 190 | | | | 265 | | | 393 | | |
| | 132S-2/7.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 967 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 423 | 4-ϕ24 | |
| IS65-40-250 | 90S-4/1.1 | 85 | 900 | 190 | 560 | 325 | 100 | 485 | 2 | 912 | 155 | 380 | 430 | 180 | 190 | 260 | 485 | 360 | 4-ϕ24 | 20 |
| | 90L-4/1.5 | | | | | 350 | | | | 937 | | | | | | | | | | |
| | 100L-4/2.2 | | | | | 395 | | | | 982 | 180 | | | | 245 | | | 405 | | |
| | 132S-2/7.5 | | 1010 | 210 | 640 | 490 | | | | 1077 | 210 | 440 | 490 | | 315 | | | 443 | | |
| | 160M-2/15 | | 1147 | 225 | 700 | 615 | | | | 1202 | 255 | 430 | 480 | | 385 | | | 485 | | |
| IS65-40-315 | 100L-4/3 | 85 | 930 | 210 | 640 | 395 | 125 | 485 | 2 | 1007 | 180 | 440 | 490 | 200 | 245 | 280 | 530 | 425 | 4-ϕ24 | 20 |
| | 112M-4/4 | | | | | 415 | | | | 1027 | 190 | | | | 265 | | | 435 | | |
| | 160L-2/18.5 | | 1147 | 225 | 700 | 660 | | | | 1272 | 255 | 430 | 480 | | 386 | | | 505 | | |
| | 180M-2/22 | | | | | 685 | | | | 1297 | 285 | | | | 430 | | | 530 | | |
| IS80-65-125 | 80-4/0.75 | 70 | 930 | 150 | 440 | 295 | 100 | 380 | 2 | 777 | 150 | 320 | 360 | 132 | 170 | 212 | 372 | 302 | 4-ϕ18.5 | 20 |
| | 100L-2/3 | | 790 | 170 | 500 | 390 | | | | 872 | 180 | 350 | 390 | | 245 | | | 357 | | |
| | 112M-2/4 | | | | | 410 | | | | 892 | 190 | | | | 265 | | | 365 | | |
| | 132S-2/5.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 967 | 210 | 400 | 450 | | 315 | | | 395 | | |

续表

| 产品型号 | 机座号/功率（kW） | 外形安装尺寸（mm） | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $A$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $a$ | $f$ | $c$ | $L_5$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $h_1$ | $h_2$ | $H$ | $H_1$ | $H_2$ | $n$-$d$ | $h_3$ |
| | 80-4/0.75 | | | | | 295 | | | | 777 | 150 | | | | 170 | | | 330 | | |
| | 90S-4/1.1 | | 780 | 170 | 500 | 320 | | | | 802 | 155 | 350 | 390 | | 190 | | | 340 | | |
| IS80-65-160 | 90L-4/1.5 | 70 | | | | 345 | 100 | 382 | 2 | 827 | | | | 160 | | 240 | 420 | | 4-$\phi$18.5 | 20 |
| | 112M-2/4 | | | | | 410 | | | | 892 | 190 | | | | 265 | | | 393 | | |
| | 132S-2/7.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 967 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 423 | | |
| | 90S-4/1.1 | | | | | 320 | | | | 802 | 155 | | | | 190 | | | 340 | | |
| | 90L-4/1.5 | | 780 | 170 | 500 | 345 | | | | 827 | | 350 | 390 | | | | | | 4-$\phi$18.5 | |
| IS80-50-200 | 100L-4/2.2 | 70 | | | | 390 | 100 | 382 | 2 | 872 | 180 | | | 160 | 245 | 240 | 440 | 385 | | 20 |
| | 132S-2/7.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 967 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 423 | 4-$\phi$24 | |
| | 160M-2/15 | | 960 | 210 | 640 | 610 | | | | 1092 | 255 | 395 | 445 | | 385 | | | 485 | | |
| | 100L-4/3 | | 900 | 190 | 560 | 395 | | | | 1007 | 180 | 380 | 430 | | 245 | | | 405 | | |
| IS80-50-250 | 160M-2/15 | 85 | | | | 615 | 125 | 485 | 2 | 1227 | 255 | | | 180 | 385 | 260 | 485 | 520 | 4-$\phi$24 | 20 |
| | 160L-2/18.5 | | 1147 | 225 | 700 | 660 | | | | 1272 | | 430 | 480 | | | | | | | |
| | 180M-2/22 | | | | | 680 | | | | 1297 | 285 | | | | 430 | | | 545 | | |
| | 112M-4/4 | | 930 | 210 | 640 | 415 | | | | 1027 | 190 | 440 | 490 | | 265 | | | 458 | | |
| IS80-50-315 | 132S-4/5.5 | 85 | 1010 | | | 490 | 125 | 485 | 2 | 1102 | 210 | | | 225 | 315 | 305 | 585 | 488 | 4-$\phi$24 | 20 |
| | 180M-2/22 | | 1147 | 225 | 700 | 685 | | | | 1297 | 285 | 430 | 480 | | 430 | | | 555 | | |
| | 200L-2/37 | | 1252 | 250 | 800 | 790 | | | | 1402 | 310 | 495 | 555 | | 475 | 315 | 595 | 600 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 80-4/0.75 | | | | | 295 | | | | 777 | 150 | | | | 170 | | | 330 | | |
| | 90S-4/1.1 | | 780 | 170 | 500 | 320 | | | | 802 | 155 | 350 | 390 | | 190 | | | 340 | 4-$\phi$18.5 | |
| IS100-80-125 | 90L-4/1.5 | 85 | | | | 345 | 100 | 380 | 2 | 827 | | | | 160 | | 240 | 420 | | | 20 |
| | 132S-2/7.5 | | 844 | 190 | 560 | 485 | | | | 967 | 210 | 340 | 390 | | 315 | | | 423 | 4-$\phi$24 | |
| | 160M-2/11 | | 960 | 210 | 640 | 610 | | | | 1092 | 255 | 395 | 445 | | 385 | | | 465 | | |
| | 90L-4/1.5 | | 900 | 190 | 560 | 350 | | | | 937 | 155 | 380 | 430 | | 190 | | | 340 | | |
| IS100-80-160 | 100L-4/2.2 | 85 | | | | 395 | 100 | 485 | 2 | 932 | 180 | | | 160 | 245 | 240 | 440 | 385 | 4-$\phi$24 | 20 |
| | 160M-2/15 | | 1147 | 225 | 700 | 615 | | | | 1202 | 255 | 430 | 480 | | 395 | | | 465 | | |
| | 100L-4/3 | | 930 | 210 | 640 | 395 | | | | 982 | 180 | 440 | 490 | | 245 | | | 485 | | |
| | 112M-4/4 | | | | | 415 | | | | 1002 | 190 | | | | 265 | | | 413 | | |
| IS100-65-200 | 160M-2/15 | 85 | | | | 615 | 100 | 485 | 2 | 1202 | 255 | | | 180 | 385 | 260 | 485 | 485 | 4-$\phi$24 | 20 |
| | 160L-2/18.5 | | 1147 | 225 | 700 | 660 | | | | 1247 | | 430 | 480 | | | | | | | |
| | 180M-2/22 | | | | | 685 | | | | 1272 | 285 | | | | 430 | | | 510 | | |

续表

| 产品型号 | 机座号/功率（kW） | 外形安装尺寸（mm） | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $A$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $a$ | $f$ | $c$ | $L_5$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $h_1$ | $h_2$ | $H$ | $H_1$ | $H_2$ | $n$-$d$ | $h_3$ |
| IS100-65-250 | 100L-4/3 | 100 | 930 | 210 | 640 | 395 | 125 | 485 | 2 | 1007 | 180 | 440 | 490 | 200 | 245 | 280 | 530 | 425 | 4-φ24 | 20 |
| | 112M-4/4 | | | | | 415 | | | | 1027 | 190 | | | | 265 | | | 433 | | |
| | 132S-4/5.5 | | 1010 | | | 490 | | | | 1102 | 210 | | | | 315 | | | 465 | | |
| | 180M-2/2.2 | | 1147 | 225 | 700 | 685 | | | | 1297 | 285 | 430 | 480 | | 430 | | | 530 | | |
| | 200L-2/37 | | 1252 | 250 | 800 | 790 | | | | 1402 | 310 | 495 | 515 | | 475 | 290 | 540 | 565 | 4-φ28 | 25 |
| IS100-65-315 | 132S-4/5.5 | 105 | 1110 | 225 | 700 | 493 | 125 | 500 | 2 | 1120 | 210 | 490 | 540 | 225 | 315 | 305 | 585 | 488 | 4-φ24 | 20 |
| | 132M-4/7.5 | | | | | 533 | | | | 1160 | | | | | | | | | | |
| | 160M-4/11 | | | | | 618 | | | | 1245 | 255 | | | | 385 | | | 530 | | |
| | 200L-2/37 | | 1252 | 1250 | 800 | 793 | | | | 1420 | 310 | 495 | 515 | | 475 | 315 | 595 | 590 | 4-φ28 | 25 |
| | 225M-2/45 | | 1369 | 299 | 920 | 833 | | | | 1460 | 345 | 575 | 635 | | 530 | | | 620 | | |
| | 250M-2/55 | | | | | 948 | | | | 1575 | 385 | | | | 575 | | | 640 | | |
| | 280S-2/75 | | 1471 | 320 | 1060 | 1018 | | | | 1645 | 410 | 630 | 690 | | 640 | 325 | 605 | 685 | | |
| IS125-100-200 | 112M-4/4 | 100 | 930 | 210 | 640 | 415 | 125 | 485 | 2 | 1027 | 190 | 440 | 490 | 200 | 265 | 280 | 560 | 433 | 4-φ24 | 20 |
| | 132S-4/4.5 | | 1010 | | | 490 | | | | 1102 | 210 | | | | 315 | | | 643 | | |
| | 132M-4/7.5 | | | | | 530 | | | | 1145 | | | | | | | | | | |
| | 180N-2/22 | | | 225 | 700 | 685 | | | | 1297 | 285 | 430 | 480 | | 430 | | | 530 | | |
| | 200L-2/37 | | 1157 | 250 | 800 | 790 | | | | 1402 | 310 | 495 | 555 | | 475 | 290 | 570 | 565 | 4-φ28 | 25 |
| | 225M-2/45 | | 1252 | | | 830 | | | | 1442 | 345 | | | | 530 | | | 595 | | |
| IS125-100-250 | 132S-4/5.5 | 105 | 1243 | 225 | 700 | 490 | 140 | 495 | 2 | 1127 | 210 | 490 | 540 | 225 | 315 | 305 | 585 | 488 | 4-φ24 | 20 |
| | 132M-4/7.5 | | 1110 | | | 530 | | | | 1167 | | | | | | | | 530 | | |
| | 160M-4/11 | | | | | 615 | | | | 1252 | 255 | | | | 385 | | | 585 | | |
| | 200L-2/37 | | 1252 | 250 | 800 | 790 | | | | 1427 | 310 | 495 | 555 | | 475 | 315 | 595 | 595 | 4-φ28 | 25 |
| | 225M-2/45 | | 1369 | 290 | 920 | 830 | | | | 1467 | 345 | 575 | 635 | | 530 | | | 620 | | |
| | 250M-2/55 | | | | | 945 | | | | 1582 | 385 | | | | 575 | | | 640 | | |
| | 280S-2/75 | | 1471 | 320 | 1060 | 1015 | | | | 1652 | 410 | 630 | 690 | | 640 | 325 | 605 | 685 | | |
| IS125-100-315 | 160M-4/11 | 105 | 1110 | 225 | 700 | 618 | 140 | 530 | 2 | 1260 | 225 | 490 | 540 | 250 | 385 | 330 | 645 | 555 | 4-φ24 | 20 |
| | 160L-4/15 | | 1151 | 250 | 700 | 663 | | | | 1305 | | 475 | 535 | | | | | 635 | | |
| | 280S-2/75 | | 1471 | 320 | 1060 | 1018 | | | | 1660 | 410 | 630 | 690 | | 640 | 350 | 665 | 710 | 4-φ28 | 25 |
| | 280M-2/90 | | | | | 1068 | | | | 1710 | | | | | | | | | | |
| | 315S-2/110 | | 1504 | | 900 | 1208 | | | | 1850 | 570 | 740 | 800 | | 865 | | | 900 | | |
| IS125-100-400 | 160L-4/15 | 125 | 1258 | 290 | 920 | 660 | 140 | 495 | 2 | 1297 | 255 | 570 | 630 | 280 | 385 | 370 | 725 | 595 | 4-φ28 | 25 |
| | 180M-4/18.5 | | | | | 685 | | | | 1322 | 285 | | | | 430 | | | 620 | | |
| | 180L-4/22 | | | | | 725 | | | | 1362 | | | | | | | | | | |
| | 200L-4/30 | | 1323 | | | 790 | | | | 1427 | 310 | | | | 475 | | | 645 | | |

续表

| 产品型号 | 机座号/功率（kW） | 外形安装尺寸（mm） | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $A$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $a$ | $f$ | $c$ | $L_5$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $h_1$ | $h_2$ | $H$ | $H_1$ | $H_2$ | $n$-$d$ | $h_3$ |
| IS150-125-250 | 160M-4/11 | 105 | 1110 | 225 | 700 | 615 | 140 | 495 | 2 | 1252 | 255 | 490 | 540 | 250 | 385 | 330 | 685 | 555 | 4-$\phi$24 | 20 |
| | 160L-4/15 | | 1151 | 250 | 800 | 660 | | | | 1297 | | | | | | | | 555 | 4-$\phi$28 | |
| | 180M-4/18.5 | | | | | 685 | | | | 1322 | 285 | 475 | 535 | | 430 | | | 580 | | |
| IS150-125-315 | 180M-4/18.5 | 123 | 1258 | 290 | 920 | 685 | 140 | 495 | 2 | 1322 | 285 | 570 | 630 | 280 | 430 | 370 | 725 | 620 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 180L-4/22 | | | | | 725 | | | | 1362 | | | | | | | | | | |
| | 200L-4/30 | | 1323 | | | 790 | | | | 1427 | 310 | | | | 475 | | | 645 | | |
| IS150-125-400 | 200L-4/30 | 123 | 1323 | 290 | 920 | 790 | 140 | 495 | 2 | 1427 | 310 | 570 | 630 | 315 | 475 | 405 | 805 | 680 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 225S-4/37 | | | | | 835 | | | | 1472 | 345 | | | | 530 | | | 710 | | |
| | 225M-4/45 | | | | | 860 | | | | 1497 | | | | | | | | | | |
| IS200-150-250 | 180L-4/22 | 123 | 1258 | 290 | 920 | 725 | 160 | 495 | 2 | 1382 | 285 | 570 | 630 | 280 | 430 | 370 | 745 | 620 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 200L-4/30 | | 1323 | | | 790 | | | | 1447 | 310 | | | | 475 | | | 645 | | |
| | 225S-4/37 | | | | | 835 | | | | 1492 | 345 | | | | 530 | | | 675 | | |
| IS200-150-315 | 200L-4/30 | 123 | 1500 | 320 | 1020 | 796 | 160 | 685 | 3 | 1639 | 310 | 625 | 685 | 315 | 475 | 415 | 815 | 690 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 225S-4/37 | | | | | 841 | | | | 1684 | 345 | | | | 530 | | | 720 | | |
| | 225M-4/45 | | | | | 866 | | | | 1709 | | | | | | | | | | |
| | 250M-4/55 | | 1635 | | | 961 | | | | 1794 | 385 | | | | 575 | | | 740 | | |
| IS200-150-400 | 225M-4/45 | 123 | 1500 | 320 | 1020 | 866 | 160 | 680 | 3 | 1709 | 345 | 625 | 685 | 315 | 530 | 415 | 865 | 720 | 4-$\phi$28 | 25 |
| | 250M-4/55 | | 1635 | | | 951 | | | | 1794 | 385 | | | | 575 | | | 740 | | |
| | 280S-4/75 | | | | | 1021 | | | | 1864 | 410 | | | | 640 | | | 775 | | |
| | 280M-4/90 | | | | | 1071 | | | | 1914 | | | | | | | | | | |

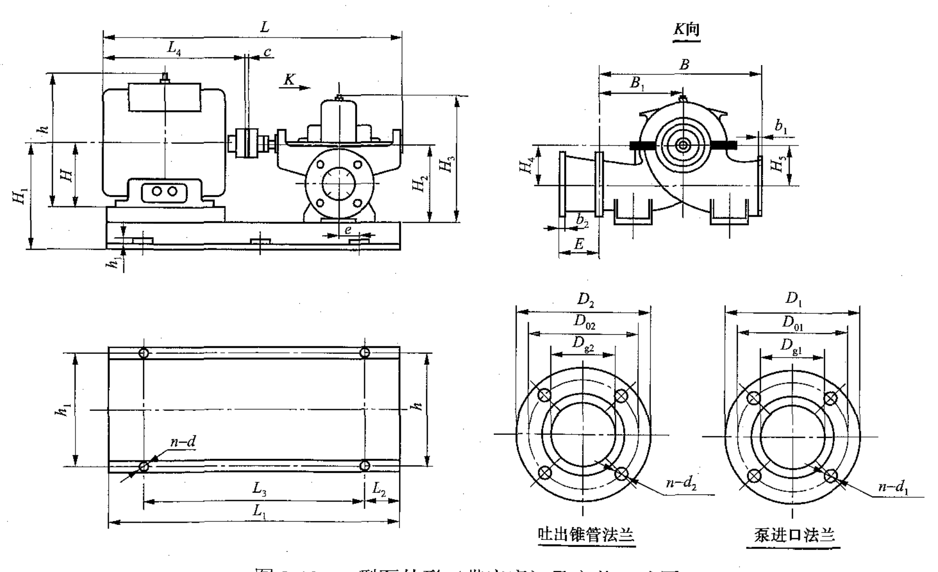



图 3-19　S 型泵外形（带底座）及安装尺寸图

表 3-13　S 型泵（带底座）安装尺寸

| 型号 | C | 电动机 | | | | | | 吐出锥管尺寸（mm） | | | | | | 进口法兰尺寸 | | | | | 底座尺寸（mm） | | | | | | | $H_1$ | $L$ | 泵外形尺寸（mm） | | | | | | $e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 型号 | 功率（kW） | 电压（V） | 安装尺寸（mm） | | | $E$ | $D_{g2}$ | $D_{02}$ | $D_2$ | $b_2$ | $n$–$d_2$ | $D_{g1}$ | $D_{01}$ | $D_1$ | $b_1$ | $n$–$d_1$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $b$ | $b_3$ | $h_1$ | $n$–$d$ | | | $B$ | $B_1$ | $H_3$ | $H_2$ | $H_5$ | $H_4$ | |
| | | | | | $L_4$ | $h$ | $H$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 150S78 | 2 | Y250M-2 | 55 | 380 | 930 | 615 | 250 | 300 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 1305 | 165 | 908 | 380 | 580 | 40 | 4-$\phi$25 | 380 | 1632 | 530 | 250 | 475 | 280 | 130 | 165 | −10 |
| 150S78A | 2 | Y225M-2 | 45 | 380 | 815 | 530 | 225 | 300 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 1305 | 165 | 908 | 380 | 580 | 40 | 4-$\phi$25 | 380 | 1517 | | | | | | | 40 |
| 150S50 | 3 | Y225M-2 | 45 | 380 | 815 | 530 | 225 | 300 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 150 | 225 | 260 | 20 | 8-$\phi$18 | 1175 | 160 | 850 | 370 | 520 | 40 | 4-$\phi$19 | 400 | 1444 | 450 | 200 | 445 | 270 | 130 | 140 | 0 |
| 150S50A | 3 | Y200L1-2 | 30 | 380 | 775 | 505 | 200 | 300 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 150 | 225 | 260 | 20 | 8-$\phi$18 | 1175 | 160 | 850 | 370 | 520 | 40 | 4-$\phi$19 | 400 | 1404 | | | | | | | 0 |
| 150S100 | 2 | Y280M-2 | 90 | 380 | 1050 | 680 | 280 | 300 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$23 | 150 | 240 | 280 | 24 | 8-$\phi$22 | 1390 | 173 | 928 | 430 | 640 | 40 | 4-$\phi$25 | 385 | 1793 | 550 | 250 | 490 | 285 | 140 | 174 | 0 |
| 200S95 | 4 | Y280M-2 | 90 | 380 | 1050 | 680 | 280 | 375 | 200 | 295 | 340 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 1549 | 235 | 1020 | 450 | 655 | 50 | 4-$\phi$25 | 470 | 1896 | 750 | 350 | 604 | 370 | 185 | 200 | −23 |
| 200S63 | 4 | Y280S-2 | 75 | 380 | 1000 | 680 | 280 | 375 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 1549 | 235 | 1020 | 450 | 655 | 50 | 4-$\phi$25 | 470 | 1826 | 650 | 270 | 568 | 350 | 175 | 175 | −23 |
| 200S63A | 4 | Y250M-2 | 55 | 380 | 930 | 615 | 250 | 375 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 1549 | 235 | 1020 | 450 | 655 | 50 | 4-$\phi$25 | 470 | 1756 | | | | | | | −23 |
| 200S42 | 4 | Y250M-2 | 55 | 380 | 930 | 575 | 250 | 375 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 280 | 315 | 28 | 8-$\phi$18 | 1447 | 252 | 900 | 450 | 610 | 50 | 4-$\phi$25 | 470 | 1699 | 550 | 250 | 542 | 350 | 160 | 165 | −40 |
| 200S42A | 4 | Y225M-2 | 45 | 380 | 815 | 530 | 225 | 375 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 280 | 315 | 28 | 8-$\phi$18 | 1447 | 252 | 900 | 450 | 610 | 50 | 4-$\phi$25 | 470 | 1584 | | | | | | | −40 |
| 200S110 | 4 | Y315M-2 | 132 | 380 | 1310 | 845 | 315 | 375 | 200 | 295 | 340 | 26 | 8-$\phi$23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-$\phi$23 | 1622 | 187.5 | 530 | 522 | 522 | 35 | 6-$\phi$26 | 585 | 2156 | 750 | 350 | 604 | 370 | 185 | 200 | 0 |
| 250S39 | 4 | Y280S-4 | 75 | 380 | 1000 | 680 | 280 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 375 | 24 | 12-$\phi$18 | 1603 | 228 | 1035 | 740 | 740 | 50 | 4-$\phi$25 | 570 | 1975 | 890 | 440 | 756 | 440 | 200 | 260 | 6 |
| 250S39A | 4 | Y250M-4 | 55 | 380 | 930 | 615 | 250 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 375 | 24 | 12-$\phi$18 | 1603 | 228 | 1035 | 740 | 740 | 50 | 4-$\phi$25 | 570 | 1905 | | | | | | | 16 |
| 250S24 | 3 | Y225M-4 | 45 | 380 | 845 | 555 | 225 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 370 | 24 | 12-$\phi$18 | 1502 | 280 | 980 | 710 | 710 | 50 | 4-$\phi$25 | 570 | 1813 | 850 | 400 | 728 | 440 | 230 | 230 | 22 |
| 250S24A | 3 | Y225S-4 | 37 | 380 | 820 | 555 | 225 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 370 | 24 | 12-$\phi$18 | 1502 | 280 | 980 | 710 | 710 | 50 | 4-$\phi$25 | 570 | 1788 | | | | | | | 22 |
| 250S14 | 4 | Y200L-4 | 30 | 380 | 775 | 505 | 200 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 370 | 24 | 12-$\phi$18 | 1393 | 258 | 948 | 540 | 540 | 50 | 4-$\phi$25 | 530 | 1687 | 750 | 350 | 671 | 400 | 200 | 240 | 6 |
| 250S14A | 4 | Y180L-4 | 22 | 380 | 710 | 455 | 180 | 300 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-$\phi$23 | 250 | 335 | 370 | 24 | 12-$\phi$18 | 1393 | 258 | 948 | 540 | 540 | 50 | 4-$\phi$25 | 530 | 1622 | | | | | | | 6 |
| 300S32 | 4 | Y315S-4 | 110 | 380 | 1270 | 845 | 315 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 300 | 395 | 435 | 24 | 12-$\phi$23 | 2018 | 361 | 1250 | 930 | 760 | 50 | 4-$\phi$25 | 670 | 2483.5 | 1040 | 500 | 854.5 | 520 | 275 | 305 | 19 |
| 300S32A | 4 | Y280S-4 | 75 | 380 | 1000 | 680 | 280 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 300 | 395 | 435 | 24 | 12-$\phi$23 | 2018 | 361 | 1250 | 930 | 760 | 50 | 4-$\phi$25 | 670 | 2213.5 | | | | | | | 19 |
| 300S19 | 4 | Y250M-4 | 55 | 380 | 930 | 615 | 250 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 1645 | 312.5 | 1020 | 765 | 685 | 50 | 4-$\phi$26 | 630 | 1912.5 | 900 | 400 | 803 | 510 | 250 | 260 | 0 |
| 300S19A | 4 | 225M-4 | 45 | 380 | 845 | 530 | 225 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-$\phi$23 | 1645 | 312.5 | 1020 | 765 | 685 | 50 | 4-$\phi$26 | 630 | 1827.5 | | | | | | | 0 |

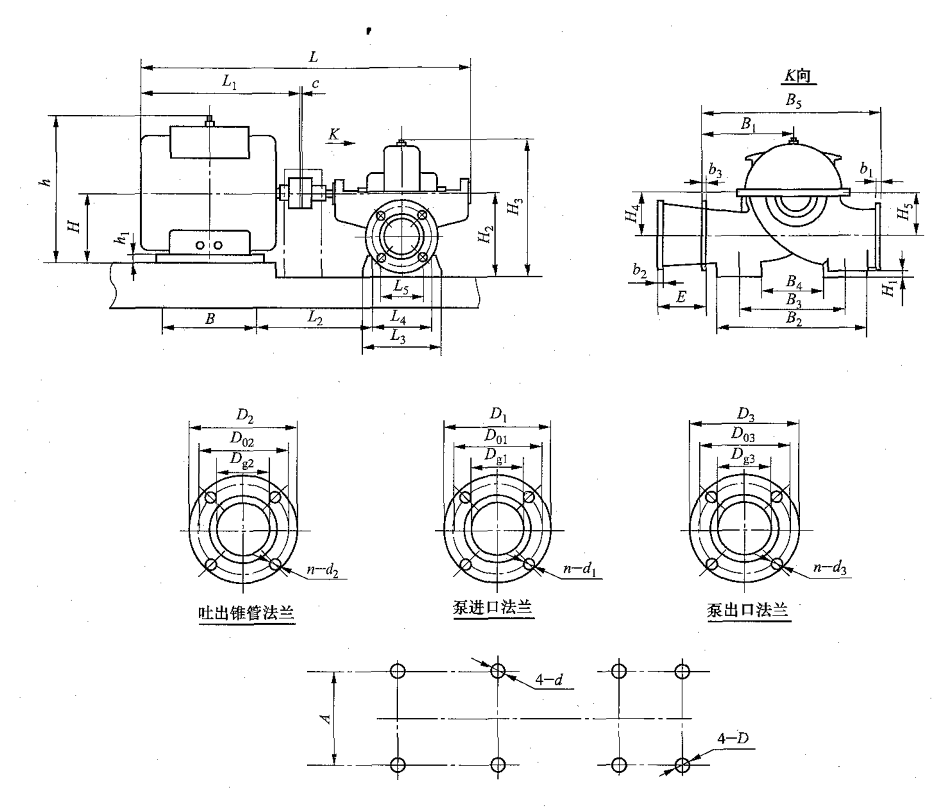



图 3-20　S 型泵外形（不带底座）及安装尺寸图

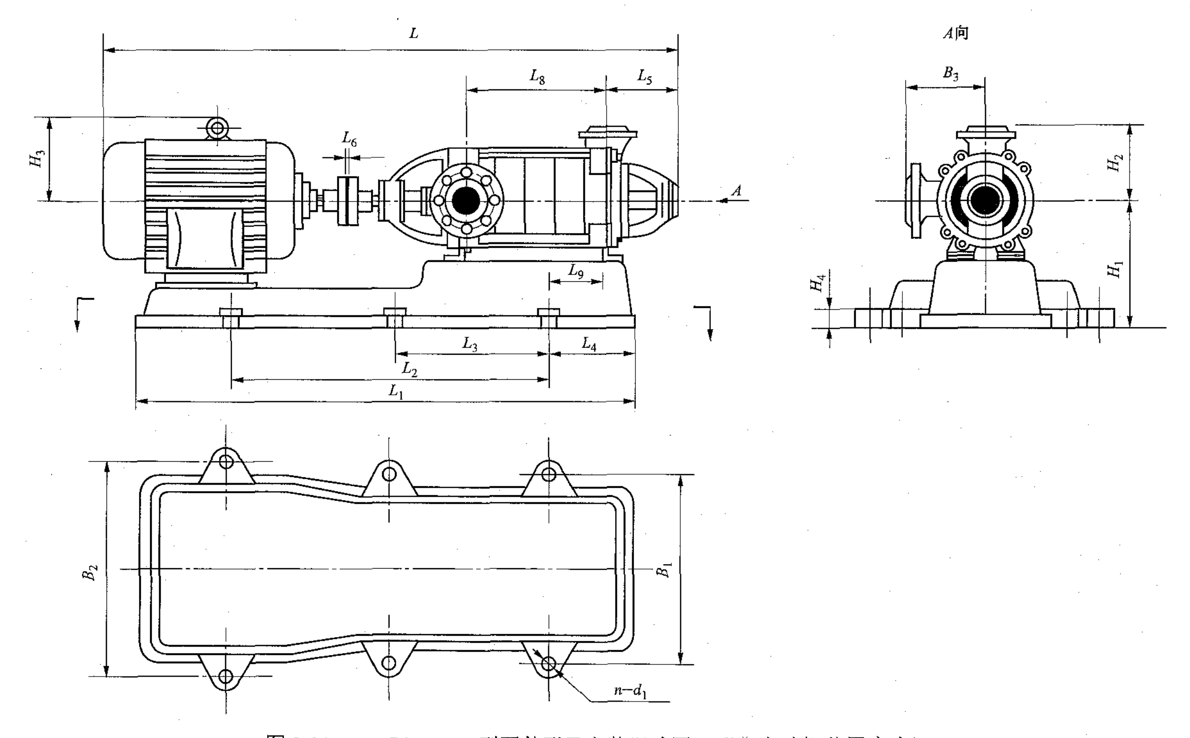



图 3-21　D、DF、DM 型泵外形及安装尺寸图（泵、电动机共用底座）

表 3-14　　S 型泵（不带底座）安装尺寸

| 型号 | C | 电动机 | | | | | | | | | | $L$ | $L_2$ | 吐出锥管尺寸（mm） | | | | | | 进口法兰尺寸（mm） | | | | | 出口法兰尺寸（mm） | | | | | 泵外形尺寸（mm） | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 型号 | 功率（kW） | 电压（V） | 安装尺寸（mm） | | | | | | | | | $E$ | $D_{g2}$ | $D_{02}$ | $D_2$ | $b_2$ | $n$-$d_2$ | $D_{g1}$ | $D_{01}$ | $D_1$ | $b_1$ | $n$-$d_1$ | $D_{g3}$ | $D_{03}$ | $D_3$ | $b_3$ | $n$-$d_3$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ | $B_5$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ | $H_3$ | $H_2$ | $H_1$ | $H_5$ | $H_4$ | $n$-$D$ |
| | | | | | $L_1$ | $H$ | $h$ | $h_1$ | $B$ | $A$ | $n$-$d$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 250S65 | 4 | Y315M-4 | 132 | 380 | 1340 | 315 | 865 | 60 | 457 | 508 | 4-φ28 | 2447 | 836 | 500 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 250 | 350 | 395 | 28 | 12-φ23 | 150 | 240 | 285 | 24 | 8-φ23 | 410 | 320 | 210 | 900 | 450 | 640 | 480 | 320 | 830 | 480 | 32 | 240 | 300 | 4-φ25 |
| 250S65A | 4 | Y315S-4 | 110 | 380 | 1270 | 315 | 865 | 60 | 406 | 508 | 4-φ28 | 2377 | 836 | 500 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 250 | 350 | 395 | 28 | 12-φ23 | 150 | 240 | 285 | 24 | 8-φ23 | 410 | 320 | 210 | 900 | 450 | 640 | 480 | 320 | 830 | 480 | 32 | 240 | 300 | 4-φ25 |
| 300S90 | 5 | Y355-4 | 315 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 3080.5 | 1000 | 500 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-φ23 | 500 | 380 | 240 | 1080 | 520 | 720 | 560 | 400 | 955 | 550 | 40 | 260 | 340 | 4-φ25 |
| 300S90A | 5 | Y355-4 | 280 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 3080.5 | 1000 | 500 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-φ23 | 500 | 380 | 240 | 1080 | 520 | 720 | 560 | 400 | 955 | 550 | 40 | 260 | 340 | 4-φ25 |
| 300S90B | 5 | Y355-4 | 220 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 3080.5 | 1000 | 500 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-φ23 | 500 | 380 | 240 | 1080 | 520 | 720 | 560 | 400 | 955 | 550 | 40 | 260 | 340 | 4-φ25 |
| 300S58 | 5 | Y355-4 | 220 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 2928 | 935 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 510 | 450 | 330 | 1070 | 530 | 620 | 550 | 430 | 852 | 510 | 40 | 240 | 310 | 4-φ27 |
| 300S58A | 5 | Y315L1-4 | 160 | 380 | 1340 | 315 | 845 | 45 | 508 | 508 | 4-φ28 | 2484.5 | 796 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 510 | 450 | 330 | 1070 | 530 | 620 | 550 | 430 | 852 | 510 | 40 | 240 | 310 | 4-φ27 |
| 300S58B | 5 | Y315M-4 | 132 | 380 | 1340 | 315 | 845 | 45 | 457 | 507 | 4-φ28 | 2484.5 | 796 | 300 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 510 | 450 | 330 | 1070 | 530 | 620 | 550 | 430 | 852 | 510 | 40 | 240 | 310 | 4-φ27 |
| 300S1251 | 5 | Y355M-4 | 250 | 380 | 1300 | 355 | 835 | 70 | 560 | 610 | 4-φ28 | 2490.5 | 899 | 500 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 200 | 295 | 335 | 26 | 8-φ23 | 500 | 380 | 240 | 1080 | 520 | 720 | 560 | 400 | 955 | 550 | 40 | 260 | 340 | 4-φ25 |
| 350S44 | 5 | Y355M1-4 | 220 | 380 | 1530 | 355 | 1010 | 52 | 560 | 610 | 4-φ28 | 2826 | 804 | 300 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 505 | 30 | 16-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 720 | 600 | 400 | 1180 | 560 | 810 | 600 | 390 | 988 | 620 | 50 | 320 | 383 | 4-φ34 |
| 350S44A | 5 | Y315L1-4 | 160 | 380 | 1340 | 315 | 845 | 60 | 508 | 508 | 4-φ28 | 2636 | 804 | 300 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 505 | 30 | 16-φ23 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 720 | 600 | 400 | 1180 | 560 | 810 | 600 | 390 | 988 | 620 | 50 | 320 | 383 | 4-φ34 |
| 350S26 | 4 | Y315M-4 | 132 | 380 | 1340 | 315 | 845 | 60 | 457 | 508 | 4-φ28 | 2617 | 843 | 300 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 445 | 485 | 26 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 24 | 12-φ23 | 570 | 480 | 370 | 1100 | 500 | 740 | 560 | 380 | 942.5 | 560 | 50 | 300 | 310 | 4-φ34 |
| 350S26A | 4 | Y315S-4 | 110 | 380 | 1270 | 315 | 845 | 60 | 406 | 508 | 4-φ28 | 2547 | 843 | 300 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 445 | 485 | 26 | 12-φ23 | 300 | 400 | 440 | 24 | 12-φ23 | 570 | 480 | 370 | 1100 | 500 | 740 | 560 | 380 | 942.5 | 560 | 50 | 300 | 310 | 4-φ34 |
| 350S16 | 4 | Y280S-4 | 75 | 380 | 1000 | 280 | 680 | 35 | 368 | 457 | 4-φ28 | 2132.5 | 706 | | | | | | | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 12-φ23 | 580 | 500 | 360 | 1168 | 584 | 680 | 600 | 450 | 970 | 620 | 50 | 310 | 310 | 4-φ34 |
| 350S16A | 4 | Y250M-4 | 55 | 380 | 930 | 250 | 640 | 35 | 349 | 406 | 4-φ24 | 2063.5 | 687 | | | | | | | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 12-φ23 | 580 | 500 | 360 | 1168 | 584 | 680 | 600 | 450 | 970 | 620 | 50 | 310 | 310 | 4-φ34 |
| 350S125 | 6 | Y450-4 | 630 | 6000 | 2180 | 450 | 1350 | 80 | 1120 | 800 | 4-φ35 | 3657 | 1117 | 750 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 200 | 310 | 360 | 36 | 12-φ25 | 690 | 560 | 382 | 1240 | 540 | 800 | 600 | 400 | 1101 | 635 | 50 | 320 | 433 | 4-φ40 |
| 350S125A | 6 | Y450-4 | 630 | 6000 | 2180 | 450 | 1350 | 80 | 1120 | 800 | 4-φ35 | 3657 | 1117 | 750 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 200 | 310 | 360 | 36 | 12-φ25 | 690 | 560 | 382 | 1240 | 540 | 800 | 600 | 400 | 1101 | 635 | 50 | 320 | 433 | 4-φ40 |
| 350S125B | 6 | Y400-4 | 500 | 6000 | 1980 | 400 | 1330 | 80 | 1000 | 710 | 4-φ35 | 3657 | 1097 | 750 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 350 | 490 | 555 | 46 | 16-φ34 | 200 | 310 | 360 | 36 | 12-φ25 | 690 | 560 | 382 | 1240 | 540 | 800 | 600 | 400 | 1101 | 635 | 50 | 320 | 433 | 4-φ40 |
| 350S75 | 5 | Y400-4 | 355 | 6000 | 1980 | 400 | 1330 | 80 | 1000 | 710 | 4-φ35 | 3212 | 1071 | 500 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 560 | 440 | 320 | 1300 | 650 | 900 | 720 | 380 | 977 | 560 | 50 | 260 | 360 | 4-φ34 |
| 350S75A | 5 | Y355-4 | 280 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 3121 | 1051 | 500 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 560 | 440 | 320 | 1300 | 650 | 900 | 720 | 380 | 977 | 560 | 50 | 260 | 360 | 4-φ34 |
| 350S75B | 5 | Y355-4 | 250 | 6000 | 1890 | 355 | 1170 | 70 | 900 | 630 | 4-φ28 | 3132 | 1051 | 500 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 560 | 440 | 320 | 1300 | 650 | 900 | 720 | 540 | 977 | 560 | 50 | 260 | 360 | 4-φ34 |
| 400S75 | 5 | Y400-4 | 400 | 6000 | 1980 | 400 | 1330 | 80 | 1000 | 710 | 4-φ35 | 3212 | 1071 | 500 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 350 | 460 | 500 | 30 | 16-φ23 | 250 | 350 | 390 | 28 | 12-φ23 | 560 | 440 | 320 | 1300 | 650 | 900 | 720 | 380 | 977 | 560 | 50 | 260 | 360 | 4-φ34 |
| 500S98 | 6 | Y500-6 | 800 | 6000 | 2550 | 500 | 1655 | 80 | 1250 | 900 | 4-φ42 | 3906 | 1297 | 1000 | 500 | 620 | 670 | 34 | 20-φ25 | 500 | 620 | 670 | 34 | 20-φ25 | 300 | 400 | 440 | 28 | 12-φ23 | 910 | 780 | 400 | 1550 | 750 | 1100 | 800 | 500 | 1487 | 900 | 110 | 425 | 545 | 4-φ41 |

表 3-15　　**D、DF、DM 型泵外形及安装尺寸（泵、电动机共用底座）**

| 泵型号 | 级数 | 基础安装尺寸（mm） | | | | | | | | 泵外形尺寸（mm） | | | | | | | | | 电动机型号 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $B_1$ | $B_2$ | $H_4$ | $n$-$d_1$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $L_5$ | $L_6$ | $L_8$ | $L_9$ | $L$ | $B_3$ | |
| 80D12<br>80DF12<br>80DM12 | 2 | 920 | 565 | | 177 | 430 | 390 | 40 | 4-$\phi$18 | 242 | 210 | 153 | 252 | 3 | 192 | 78 | 1113 | 170 | Y112M-2 |
| | 3 | 1067 | 700 | | 187 | 410 | 410 | 40 | 4-$\phi$18 | 250 | 210 | 183 | 252 | 3 | 262 | 76 | 1258 | 170 | Y132S1-2 |
| | 4 | 1067 | 700 | | 187 | 410 | 410 | 40 | 4-$\phi$18 | 250 | 210 | 183 | 252 | 3 | 332 | 111 | 1328 | 170 | Y132S2-2 |
| | 5 | 1388 | 905 | | 243 | 444 | 444 | 40 | 4-$\phi$24 | 260 | 210 | 225 | 252 | 3 | 402 | 96 | 1528 | 170 | Y160M2-2 |
| | 6 | 1388 | 905 | | 243 | 444 | 444 | 40 | 4-$\phi$24 | 260 | 210 | 225 | 252 | 3 | 472 | 136 | 1598 | 170 | Y160M2-2 |
| | 7 | 1529 | 1050 | | 275 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$24 | 250 | 210 | 225 | 252 | 3 | 542 | 149 | 1713 | 170 | Y160L-2 |
| | 8 | 1529 | 1050 | | 275 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$24 | 250 | 210 | 225 | 252 | 3 | 612 | 184 | 1783 | 170 | Y160L-2 |
| | 9 | 1576 | 1050 | | 275 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$24 | 250 | 210 | 225 | 252 | 3 | 682 | 200 | 1853 | 170 | Y160L-2 |
| 80D30<br>80DF30<br>80DM30 | 3 | 1114 | 800 | | 155 | 435 | 435 | 40 | 4-$\phi$18 | 270 | 210 | 250 | 257 | 2 | 203 | 86 | 1400 | 210 | Y180M-2 |
| | 4 | 1392 | 870 | | 272 | 522 | 522 | 40 | 4-$\phi$24 | 290 | 210 | 275 | 257 | 2 | 264 | 103 | 1566 | 210 | Y200L1-2 |
| | 5 | 1392 | 870 | | 272 | 522 | 522 | 40 | 4-$\phi$24 | 290 | 210 | 275 | 257 | 2 | 325 | 134 | 1627 | 210 | Y200L2-2 |
| | 6 | 1392 | 870 | | 272 | 522 | 522 | 40 | 4-$\phi$24 | 290 | 210 | 275 | 257 | 2 | 386 | 202 | 1698 | 210 | Y200L2-2 |
| | 7 | 1583 | 1025 | | 345 | 425 | 525 | 40 | 4-$\phi$24 | 325 | 210 | 305 | 257 | 2 | 447 | 185 | 1799 | 210 | Y225M-2 |
| | 8 | 1737 | 1060 | | 337 | 530 | 590 | 40 | 4-$\phi$24 | 350 | 210 | 325 | 257 | 2 | 508 | 206 | 1975 | 210 | Y250M-2 |
| | 9 | 1737 | 1060 | — | 337 | 530 | 590 | 40 | 4-$\phi$24 | 350 | 210 | 325 | 257 | 2 | 569 | 253 | 2036 | 210 | Y250M-2 |
| | 10 | 1830 | 1300 | 565 | 400 | 535 | 656 | 40 | 6-$\phi$25 | 390 | 210 | 360 | 257 | 2 | 630 | 326 | 2167 | 210 | Y280S-2 |
| 100D16<br>100DF16<br>100DM16 | 2 | 1022 | 670 | | 195 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$18 | 285 | 230 | 183 | 261 | 3 | 229 | 88 | 1221 | 220 | Y132S2-2 |
| | 3 | 1300 | 815 | | 245 | 465 | 465 | 40 | 4-$\phi$18 | 280 | 230 | 225 | 261 | 3 | 306 | 73 | 1428 | 220 | Y160M1-2 |
| | 4 | 1300 | 815 | | 245 | 465 | 465 | 40 | 4-$\phi$18 | 280 | 230 | 225 | 261 | 3 | 383 | 135 | 1533 | 220 | Y160M2-2 |
| | 5 | 1529 | 1050 | | 275 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$18 | 275 | 230 | 250 | 261 | 3 | 460 | 115 | 1675 | 220 | Y180M-2 |
| | 6 | 1529 | 1050 | | 275 | 445 | 445 | 40 | 4-$\phi$18 | 275 | 230 | 250 | 261 | 3 | 537 | 152 | 1752 | 220 | Y180M-2 |
| | 7 | 1746 | 1120 | | 410 | 495 | 495 | 40 | 4-$\phi$18 | 305 | 230 | 275 | 261 | 3 | 614 | 261 | 1934 | 220 | Y200L1-2 |
| | 8 | 1746 | 1120 | | 410 | 495 | 495 | 40 | 4-$\phi$18 | 305 | 230 | 275 | 261 | 3 | 691 | 299 | 2011 | 220 | Y200L1-2 |
| | 9 | 1746 | 1120 | | 410 | 495 | 495 | 40 | 4-$\phi$18 | 305 | 230 | 275 | 261 | 3 | 768 | 338 | 2088 | 220 | Y200L2-2 |
| 100D45<br>100DF45<br>100DM45 | 2 | 1238 | 848 | | 100 | 490 | 490 | 40 | 4-$\phi$25 | 315 | 250 | 275 | 272 | 2 | 203 | 102 | 1559 | 250 | Y200L2-2 |
| | 3 | 1440 | 980 | | 245 | 547 | 595 | 40 | 4-$\phi$25 | 350 | 250 | 325 | 272 | 2 | 277 | 149 | 1788 | 250 | Y250M-2 |
| | 4 | 1724 | 1100 | | 320 | 510 | 650 | 40 | 4-$\phi$24 | 390 | 250 | 360 | 272 | 2 | 351 | 126 | 1932 | 250 | Y280S-2 |
| | 5 | 1724 | 1100 | | 320 | 510 | 650 | 40 | 4-$\phi$24 | 390 | 250 | 360 | 272 | 3 | 425 | 222 | 2062 | 250 | Y280M-2 |
| | 6 | 1835 | 1130 | | 340 | 565 | 800 | 45 | 4-$\phi$25 | 430 | 250 | 550 | 272 | 3 | 499 | 230 | 2326 | 250 | Y315S-2 |
| | 7 | 2081 | 1300 | 500 | 450 | 570 | 804 | 50 | 6-$\phi$34 | 450 | 250 | 550 | 272 | 3 | 573 | 274 | 2470 | 250 | Y315M1-2 |
| | 8 | 2081 | 1300 | 500 | 450 | 570 | 804 | 50 | 6-$\phi$34 | 450 | 250 | 550 | 272 | 3 | 647 | 311 | 2544 | 250 | Y315L1-2 |
| | 9 | 2081 | 1300 | 500 | 450 | 570 | 804 | 50 | 6-$\phi$34 | 450 | 250 | 550 | 272 | 3 | 721 | 346 | 2608 | 250 | Y315L1-2 |

续表

| 泵型号 | 级数 | 基础安装尺寸（mm） | | | | | | | | 泵外形尺寸（mm） | | | | | | | | | 电动机型号 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $B_1$ | $B_2$ | $H_4$ | $n$-$d_1$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $L_5$ | $L_6$ | $L_8$ | $L_9$ | $L$ | $B_3$ | |
| 125D25<br>125DF25<br>125DM25 | 2 | 1238 | 848 | | 190 | 490 | 490 | 40 | 4-$\phi$25 | 320 | 300 | 250 | 236 | 3 | 265 | 88 | 1452 | 280 | Y180M-2 |
| | 3 | 1440 | 980 | | 245 | 547 | 595 | 40 | 4-$\phi$25 | 355 | 300 | 275 | 236 | 3 | 355 | 113 | 1647 | 280 | Y200L1-2 |
| | 4 | 1440 | 980 | | 245 | 547 | 595 | 40 | 4-$\phi$25 | 355 | 300 | 275 | 236 | 3 | 445 | 158 | 1737 | 280 | Y200L2-2 |
| | 5 | 1716 | 1108 | | 320 | 551 | 641 | 40 | 4-$\phi$24 | 340 | 300 | 305 | 236 | 3 | 535 | 149 | 1867 | 280 | Y225M-2 |
| | 6 | 1716 | 1108 | | 320 | 551 | 641 | 40 | 4-$\phi$24 | 340 | 300 | 325 | 236 | 3 | 625 | 255 | 2072 | 280 | Y250M-2 |
| | 7 | 2136 | 1535 | 770 | 300 | 536 | 650 | 40 | 6-$\phi$25 | 390 | 300 | 360 | 236 | 3 | 715 | 100 | 2232 | 280 | Y280S-2 |
| | 8 | 2136 | 1535 | 770 | 300 | 536 | 650 | 40 | 6-$\phi$25 | 390 | 300 | 360 | 236 | 3 | 805 | 145 | 2322 | 280 | Y280S-2 |
| | 9 | 2136 | 1535 | 770 | 300 | 536 | 650 | 40 | 6-$\phi$25 | 390 | 300 | 360 | 236 | 3 | 895 | 216 | 2458 | 280 | Y280M-2 |
| | 10 | 2215 | 1535 | 770 | 300 | 536 | 650 | 40 | 6-$\phi$30 | 390 | 300 | 360 | 236 | 3 | 985 | 202 | 2552 | 280 | Y280M-2 |
| 150D30<br>150DF30<br>150DM30<br>200D43<br>200DF43<br>200DM43 | 3 | 1865 | 1235 | 665 | 312 | 660 | 660 | 40 | 6-$\phi$27 | 400 | 350 | 360 | 355 | 4 | 425 | 155 | 2172 | 350 | Y280S-4 |
| | 4 | 1865 | 1235 | 665 | 312 | 660 | 660 | 40 | 6-$\phi$27 | 400 | 350 | 360 | 355 | 4 | 540 | 241 | 2337 | 350 | Y280M-4 |
| | 2 | 1947 | 1305 | 675 | 310 | 760 | 760 | 45 | 6-$\phi$32 | 455 | 400 | 550 | 380 | 5 | 373 | 111 | 2418 | 450 | Y315S-4 |
| | 3 | 1947 | 1305 | 675 | 310 | 760 | 760 | 45 | 6-$\phi$32 | 455 | 400 | 550 | 380 | 5 | 503 | 241 | 2618 | 450 | Y315M2-4 |

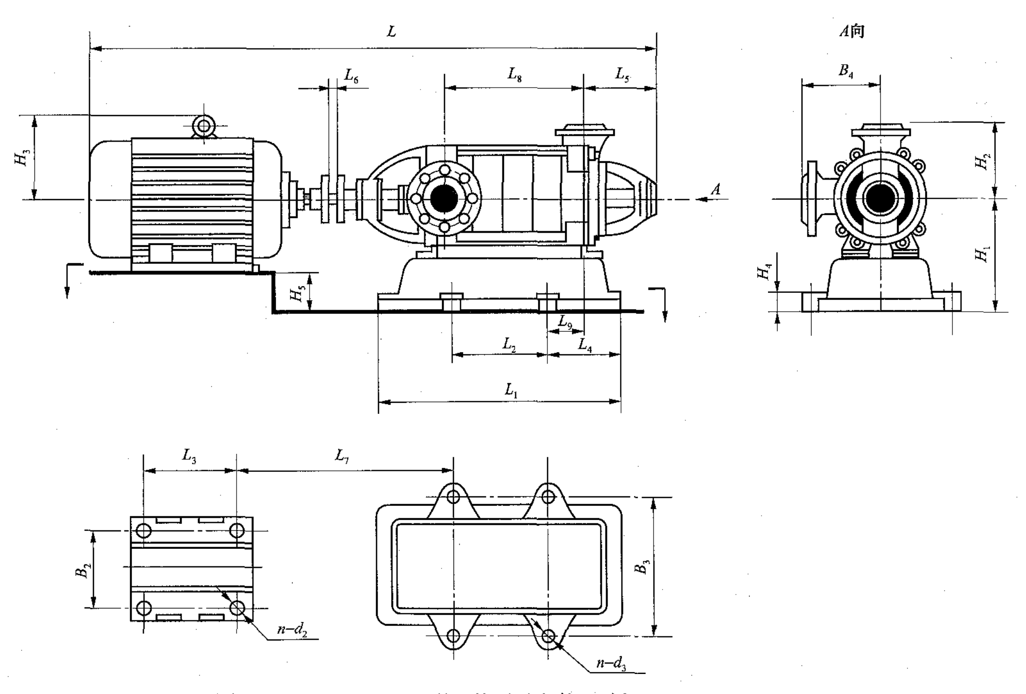



图 3-22 D、DF、DM 型泵外形及安装尺寸图（泵带单独底座）

表 3-16　　D、DF、DM 型泵外形及安装尺寸（泵带单独底座）

| 泵型号 | 级数 | 基础安装尺寸 | | | | | | | | | | | 泵电动机外形尺寸 | | | | | | | | | 电动机型号 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $B_2$ | $B_3$ | $H_4$ | $H_5$ | $L_7$ | $n$-$d_2$ | $n$-$d_3$ | $L$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $B_4$ | $L_5$ | $L_6$ | $L_8$ | $L_9$ | |
| 100D16<br>100DF16<br>100DM16 | 2 | 471 | 291 | 140 | 90 | 216 | 440 | 40 | 173 | 417 | 4-φ12 | 4-φ19 | 1221 | 305 | 230 | 183 | 220 | 261 | 3 | 229 | -54.5 | Y132S2-2 |
| | 3 | 548 | 368 | 210 | 90 | 254 | 440 | 40 | 145 | 466 | 4-φ15 | 4-φ19 | 1428 | 305 | 230 | 225 | 220 | 261 | 3 | 306 | -54.5 | Y160M1-2 |
| | 4 | 548 | 368 | 210 | 90 | 254 | 440 | 40 | 145 | 525 | 4-φ15 | 4-φ19 | 1533 | 305 | 230 | 225 | 220 | 261 | 3 | 383 | -16 | Y160M2-2 |
| | 5 | 548 | 368 | 241 | 90 | 279 | 440 | 40 | 125 | 576 | 4-φ15 | 4-φ19 | 1675 | 305 | 230 | 250 | 220 | 261 | 3 | 460 | 22.5 | Y180M-2 |
| | 6 | 702 | 522 | 241 | 90 | 279 | 440 | 40 | 125 | 538 | 4-φ15 | 4-φ19 | 1752 | 305 | 230 | 250 | 220 | 261 | 3 | 537 | -16 | Y180M-2 |
| | 7 | 702 | 522 | 305 | 90 | 318 | 440 | 40 | 105 | 588.5 | 4-φ19 | 4-φ19 | 1934 | 305 | 230 | 275 | 220 | 261 | 3 | 614 | 22.5 | Y200L1-2 |
| | 8 | 856 | 676 | 305 | 90 | 318 | 440 | 40 | 105 | 550 | 4-φ19 | 4-φ19 | 2011 | 305 | 230 | 275 | 220 | 261 | 3 | 691 | -16 | Y200L1-2 |
| | 9 | 856 | 676 | 305 | 90 | 318 | 440 | 40 | 105 | 588.5 | 4-φ19 | 4-φ19 | 2088 | 305 | 230 | 275 | 220 | 261 | 3 | 768 | 22.5 | Y200L2-4 |
| 150D30<br>150DF30<br>150DM30 | 3 | 730 | 450 | 368 | 140 | 457 | 600 | 40 | 120 | 709.5 | 4-φ24 | 4-φ27 | 2172 | 400 | 350 | 360 | 350 | 355 | 4 | 425 | -12.5 | Y280S-4 |
| | 4 | 730 | 450 | 419 | 140 | 457 | 600 | 45 | 120 | 767 | 4-φ24 | 4-φ27 | 2337 | 400 | 350 | 360 | 350 | 355 | 4 | 540 | 45 | Y280M-4 |
| | 5 | 1075 | 795 | 406 | 140 | 508 | 600 | 45 | 85 | 738 | 4-φ28 | 4-φ27 | 2702 | 400 | 350 | 550 | 350 | 355 | 4 | 655 | -70 | Y315S-4 |
| | 6 | 1075 | 795 | 457 | 140 | 508 | 600 | 45 | 85 | 795 | 4-φ28 | 4-φ27 | 2887 | 400 | 350 | 550 | 350 | 355 | 4 | 770 | -12.5 | Y315M-4 |
| | 7 | 1075 | 795 | 457 | 140 | 508 | 600 | 45 | 85 | 853 | 4-φ28 | 4-φ27 | 3002 | 400 | 350 | 550 | 350 | 355 | 4 | 885 | 45 | Y315M-4 |
| | 8 | 1400 | 1120 | 560 | 140 | 610 | 600 | 45 | 45 | 786 | 4-φ28 | 4-φ27 | 3307 | 400 | 350 | 680 | 350 | 355 | 4 | 1000 | -60 | Y355M-4 |
| | 9 | 1400 | 1120 | 560 | 140 | 610 | 600 | 45 | 45 | 843 | 4-φ28 | 4-φ27 | 3422 | 400 | 350 | 680 | 350 | 355 | 4 | 1115 | -2.50 | Y355M-4 |
| | 10 | 1400 | 1120 | 560 | 140 | 610 | 600 | 45 | 45 | 901 | 4-φ28 | 4-φ27 | 3537 | 400 | 350 | 680 | 350 | 355 | 4 | 1230 | 55 | Y355M-4 |
| 200D43<br>200DF43<br>200DM43 | 2 | 725 | 425 | 406 | 150 | 508 | 700 | 45 | 135 | 762 | 4-φ28 | 4-φ30 | 2418 | 450 | 400 | 550 | 450 | 380 | 5 | 373 | -35.5 | Y315S-4 |
| | 3 | 725 | 425 | 457 | 150 | 508 | 700 | 45 | 135 | 826 | 4-φ28 | 4-φ30 | 2618 | 450 | 400 | 550 | 450 | 380 | 5 | 503 | 29.5 | Y315M2-4 |
| | 4 | 725 | 425 | 560 | 150 | 610 | 700 | 45 | 95 | 930 | 4-φ28 | 4-φ30 | 2938 | 450 | 400 | 680 | 450 | 380 | 5 | 633 | 94.5 | Y355M-4 |
| | 5 | 1115 | 815 | 630 | 150 | 610 | 700 | 45 | 95 | 800 | 4-φ28 | 4-φ30 | 3108 | 450 | 400 | 680 | 450 | 380 | 5 | 763 | -35.5 | Y355L-4 |
| | 6 | 1115 | 815 | 630 | 150 | 610 | 700 | 45 | 95 | 864 | 4-φ28 | 4-φ30 | 3238 | 450 | 400 | 680 | 450 | 380 | 5 | 893 | 29.5 | Y355L-4 |
| | 7 | 1115 | 815 | 1000 | 150 | 710 | 700 | 45 | 50 | 1080 | 4-φ35 | 4-φ30 | 3554 | 450 | 400 | 930 | 450 | 380 | 5 | 1023 | 94.5 | Y400-4<br>（6kV） |
| | 8 | 1375 | 1155 | 1000 | 110 | 710 | 700 | 45 | 50 | 973 | 4-φ35 | 4-φ30 | 3684 | 450 | 400 | 930 | 450 | 380 | 5 | 1153 | -10.5 | Y400-4<br>（6kV） |
| | 9 | 1375 | 1155 | 1000 | 110 | 710 | 700 | 45 | 50 | 1040 | 4-φ35 | 4-φ30 | 3814 | 450 | 400 | 930 | 450 | 380 | 5 | 1283 | 54.5 | Y400-4<br>（6kV） |
| 250D43<br>250DF43<br>250DM43 | 3 | 808 | 661 | 1120 | 73.5 | 800 | 666 | 35 | 200 | 1167 | 4-φ35 | 4-φ26 | 3592 | 650 | 514 | 1025 | 518 | 502 | 5 | 5880 | -28.3 | Y450-4<br>（10kV） |
| | 4 | 965 | 780 | 1120 | 73.5 | 800 | 666 | 35 | 200 | 1167 | 4-φ35 | 4-φ26 | 3749.5 | 650 | 514 | 1025 | 518 | 502 | 5 | 745.5 | -28.3 | Y450-4<br>（10kV） |
| | 5 | 1123 | 976 | 1120 | 73.5 | 800 | 666 | 35 | 200 | 1167 | 4-φ35 | 4-φ26 | 3907 | 650 | 514 | 1025 | 518 | 502 | 5 | 903 | -28.3 | Y450-4<br>（10kV） |
| | 6 | 1280 | 1095 | 1120 | 73.5 | 800 | 666 | 35 | 200 | 1167 | 4-φ35 | 4-φ26 | 4064.5 | 650 | 514 | 1025 | 518 | 502 | 5 | 1060.5 | -28.3 | Y450-4<br>（10kV） |

## 五、布置设计

1. 脱水仓

脱水仓底部排渣口的标高应按运转设备要求确定。脱水仓运转层标高应按运渣车辆（船舶）或其他转运设备的要求确定。

2. 高效浓缩机

（1）高效浓缩机的溢流水应循环使用，回水溢流管的坡度不应小于 0.2%。

（2）高效浓缩机底部管道布置应满足：①排浆管的坡度宜大于 1%；②排浆管道应设有反冲洗水管道，冲洗水源应可靠，水压不应小于 0.4MPa。

3. 典型布置图

某工程新建 2×330MW 燃煤机组。两台炉除渣系统共设 1 套（2 台）直径为 10m 的脱水仓，其中 1 台进渣浆，1 台静止脱水。设 2 台直径为 10m 的高效浓缩机，其中 1 台运行，1 台备用。该工程位于寒冷地区，考虑了防冻措施。脱水仓、高效浓缩机均布置在室内并设计有采暖设施。

脱水仓、高效浓缩机的布置如图 3-23 所示。

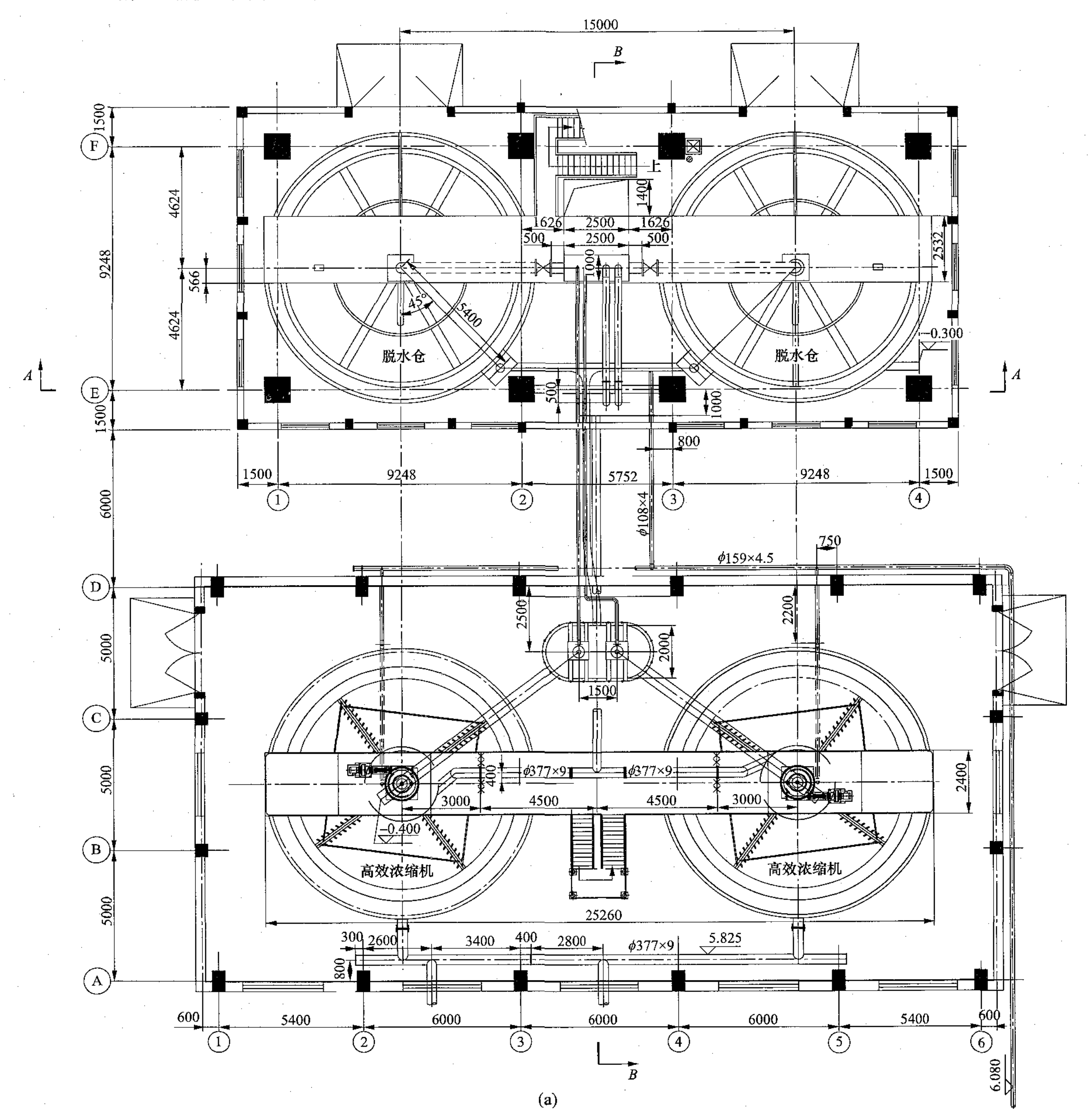
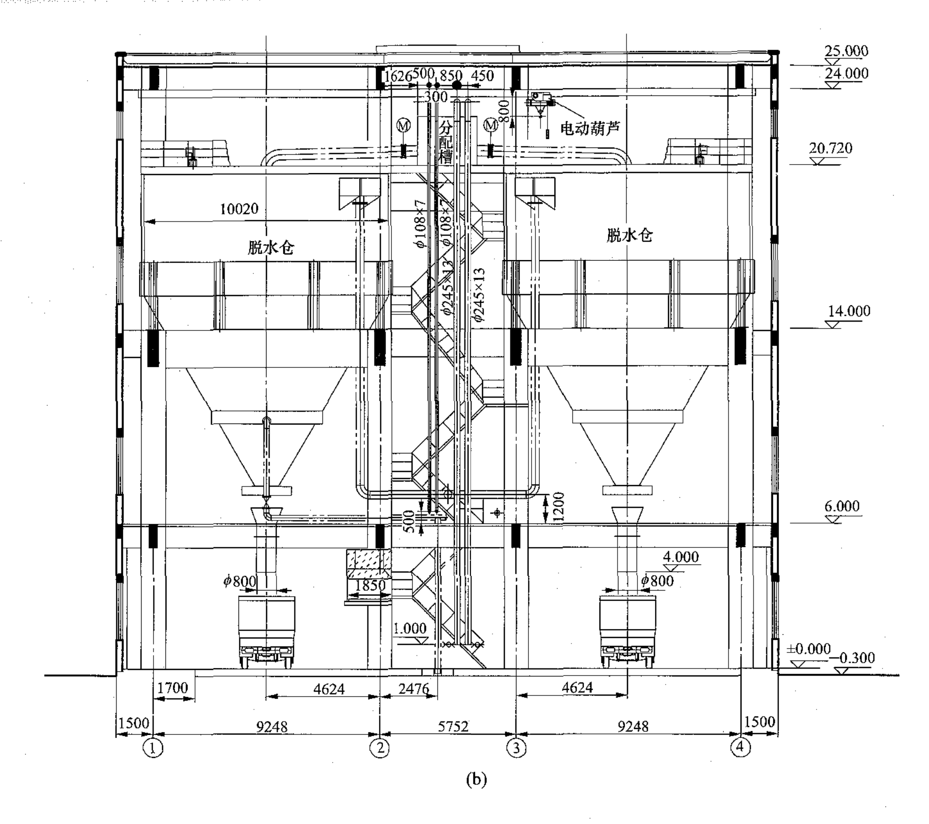
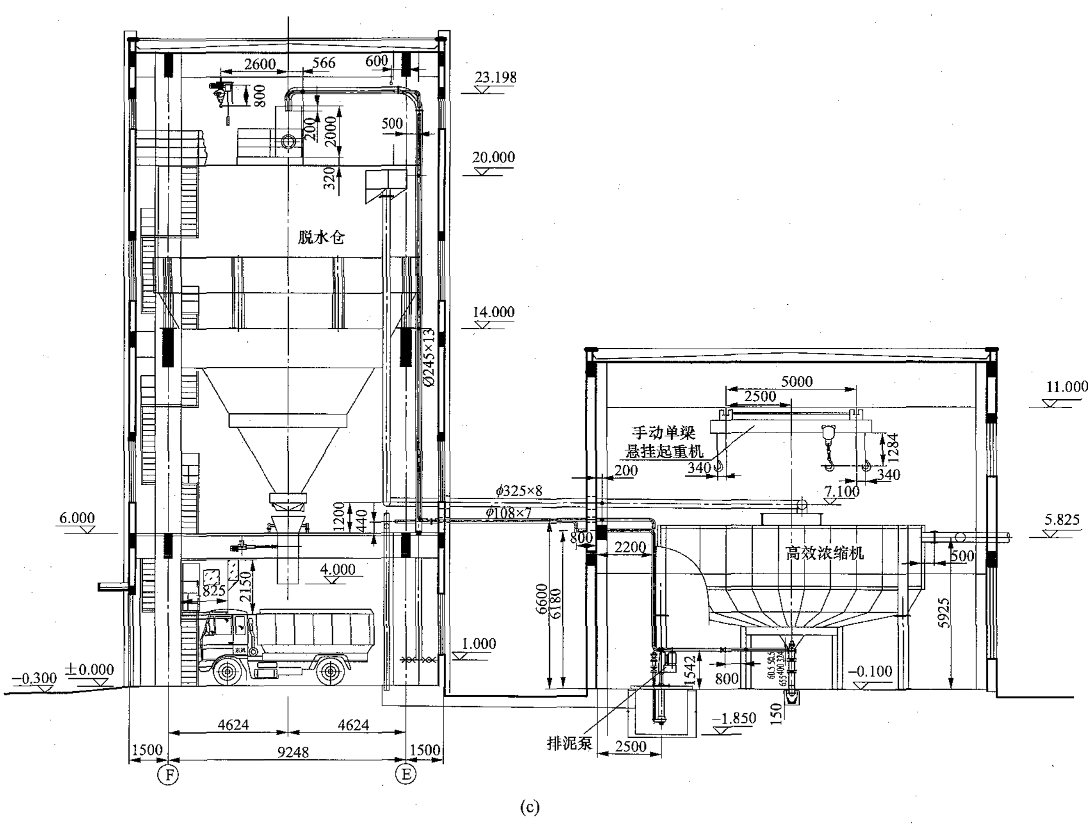



图 3-23　脱水仓、高效浓缩机的布置图（一）

（a）平面布置图




(b)




(c)

图 3-23　脱水仓、高效浓缩机的布置图（二）

（b）*A–A* 剖视图；（c）*B–B* 剖视图

## 第二节　灰渣沟输送系统

灰渣沟由铸石镶板、激流喷嘴等组成，功能就是利用激流喷嘴和沟道的坡度产生的动能将灰渣浆输送到目的地。设计范围通常为灰渣沟起点至灰渣浆池进口。

### 一、设计计算

1. 渣沟中混合物流量

$$G_{zs}=\frac{G_z}{\rho_z}+Q_{cx}^{z} \tag{3-17}$$

式中　$G_{zs}$——渣沟中混合物流量，$m^3/h$；

$G_z$——实际排入渣沟的渣量，t/h；

$\rho_z$——渣的真实密度，$t/m^3$，见附录B；

$Q_{cx}^{z}$——排入渣沟的全部冲渣水量，$m^3/h$，按式（3-18）、式（3-19）计算。

2. 排入渣沟的全部冲渣水量

（1）当锅炉为固态排渣炉时，按式（3-18）计算

$$Q_{cx}^{z}=(1-b)n_g Q_x+\sum Q_{cz}^{x}+\sum Q_j \tag{3-18}$$

式中　$Q_{cx}^{z}$——排入渣沟的全部冲渣水量，$m^3/h$；

$b$——熄火水蒸发系数，可取0.15～0.2；

$n_g$——运行锅炉台数，台；

$Q_x$——锅炉熄火水量，$m^3/h$；

$\sum Q_{cz}^{x}$——正在冲洗的各型排渣装置排渣时的总耗水量，$m^3/h$；

$\sum Q_j$——渣沟中运行的激流喷嘴总耗水量，$m^3/h$。

（2）当锅炉为液态排渣炉时，按式（3-19）计算

$$Q_{cx}^{z}=(1-b_y)Q_{lhz}+\sum Q_j \tag{3-19}$$

式中　$Q_{cx}^{z}$——排入渣沟的全部冲渣水量，$m^3/h$；

$b_y$——粒化水蒸发系数，可取0.15～0.2；

$Q_{lhz}$——全部锅炉粒化水量，$m^3/h$；

$\sum Q_j$——冲液态渣系统中运行的激流喷嘴总耗水量，$m^3/h$。

灰渣沟激流喷嘴耗水量按式（3-20）计算。箱式冲灰器等设备中喷嘴耗水量都按式（3-20）计算

$$Q_j=3.98\times10^3\varphi_j d^2 p^{0.5} \tag{3-20}$$

式中　$Q_j$——单个喷嘴的流量，$m^3/h$；

$d$——喷嘴的直径，m；

$p$——喷嘴入口处冲洗水压力，kPa；

$\varphi_j$——流量系数，可以按表3-17选取。

表3-17　$\varphi_j$与喷嘴直径的关系

| 喷嘴直径（mm） | 8 | 10～16 | 18 | 20～22 |
|---|---|---|---|---|
| $\varphi_j$ | 0.7 | 0.75 | 0.8 | 0.85 |

3. 排入灰沟的全部冲灰水量

$$Q_{cx}^{h}=m_{ch}Q_{ch}+\sum Q_j \tag{3-21}$$

式中　$Q_{cx}^{h}$——排入灰沟的全部冲灰水量，$m^3/h$。

$m_{ch}$——同时运行的制浆设备数量，台；

$Q_{ch}$——单台制浆设备的耗水量，$m^3/h$；

$\sum Q_j$——冲灰系统灰沟中运行的激流喷嘴总耗水量，$m^3/h$。

4. 灰沟中混合物流量

$$G_{hs}=\frac{G_h}{\rho_h}+Q_{cx}^{h} \tag{3-22}$$

式中　$G_{hs}$——灰沟中混合物流量，$m^3/h$；

$G_h$——实际排入灰沟的灰量，t/h；

$\rho_h$——灰的真实密度，$t/m^3$，见附录B；

$Q_{cx}^{h}$——排入灰沟的全部冲灰水量，$m^3/h$。

5. 灰渣沟中混合物流量

$$G_{hz}=G_{zs}+G_{hs} \tag{3-23}$$

式中　$G_{hz}$——灰渣沟中混合物流量，$m^3/h$，其他符号同式（3-17）、式（3-22）。

### 二、镶板选型

#### （一）镶板半径选型及计算

从防止灰渣沟磨蚀的角度出发，最大水深应不超过镶板的净高$H_j$，再考虑20～30mm的裕度就可。灰渣沟镶板断面见图3-24。灰渣沟镶板的有关尺寸参见表3-18。

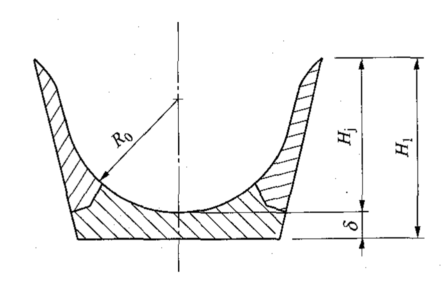



图3-24　灰渣沟镶板断面图

表3-18　灰渣沟镶板的有关尺寸　(mm)

| 镶板半径$R_0$ | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 350 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 组合后全高$H_1$ | 260 | | | | 335 | | | 360 | 395 |
| 底厚$\delta$ | 35 | | | | | | | | |
| 净高$H_j$ | 225 | | | | 300 | | | 325 | 360 |

在一般情况下，火力发电厂灰渣沟镶板半径采用150mm和225mm已能满足实际要求。300mm镶板则可满足特大流量的要求。这三种镶板所能通过的流量参见表3-19。

**表3-19　　灰渣沟镶板所能通过的流量**

| 镶板半径 $R_0$（mm） | 镶板净高 $H_j$（mm） | 实际水深 $H$（mm） | 坡度 $i$ | 流量（$m^3/h$） |
|---|---|---|---|---|
| 150 | 225 | 200 | 0.01 | 373 |
| | | | 0.015 | 456 |
| 225 | 300 | 275 | 0.01 | 940 |
| | | | 0.015 | 1150 |
| 300 | 325 | 300 | 0.01 | 1550 |
| | | | 0.015 | 1880 |

当水深超过镶板半径时，可根据下面的公式来计算流量，这些公式也是绘制曲线图所用的公式。

（1）假定流体深度 $H$（mm），即实际水深 $H$。

（2）根据 $H$ 计算灰渣沟的湿周 $C$（mm）。

（3）计算对应的过流断面积 $A$（$mm^2$）。

（4）求水力半径

$$R_n = \frac{A}{C} \tag{3-24}$$

（5）计算灰渣沟中流体的流速

$$v_g = \frac{1}{\varepsilon} R^{2/3} i^{1/2} \tag{3-25}$$

式中　$v_g$——灰渣沟中流体的流速，m/s；

$\varepsilon$——灰渣沟镶板的表面粗糙度系数，对辉绿岩铸石镶板取0.01；

$i$——灰渣沟坡度，见设计要求中的坡度。

最终计算出的灰渣沟的流速要求为：灰沟，≥1.0m/s；灰渣沟，≥1.6m/s；渣沟，≥1.8m/s；液态渣沟，≥2.2m/s。

（6）灰渣沟中的流量

$$G_{hz} = 3600 A v_g \tag{3-26}$$

此流量值应接近实际混合物流量，否则应调整水深 $H$ 和坡度 $i$ 重新计算。

**（二）镶板选型曲线图**

灰渣沟镶板半径的选择也可以通过镶板曲线图来进行。曲线图中对水深一般只绘制到镶板半径。实际工程设计中，事实上不需要这样多的镶板品种，但为了根据流量可以方便地估算流速和水深，所以仍保留这些镶板曲线图供参考。各种镶板曲线见图3-25～图3-33。

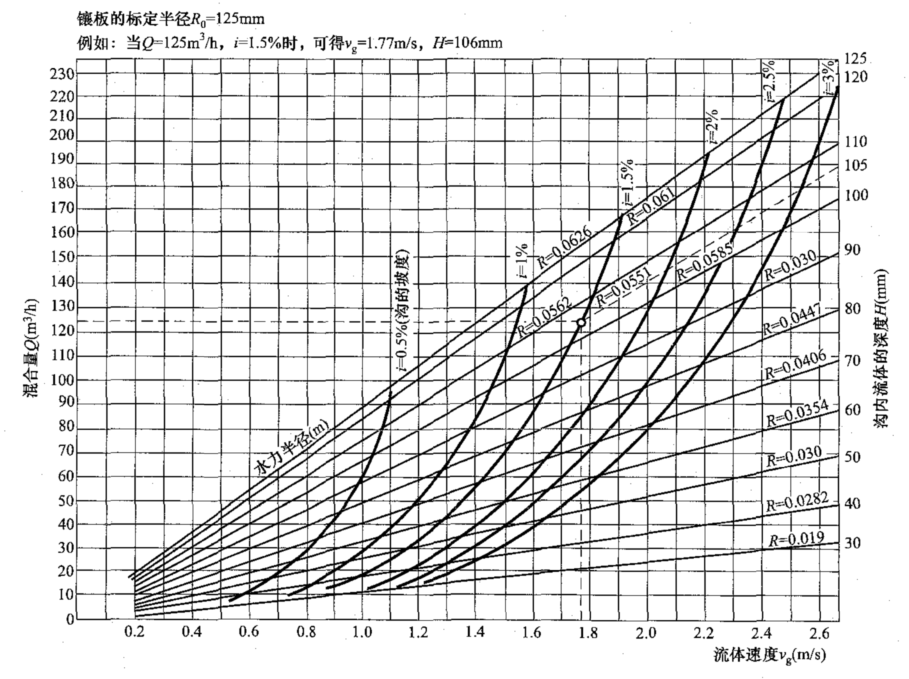



图3-25　灰渣沟镶板选型曲线（一）

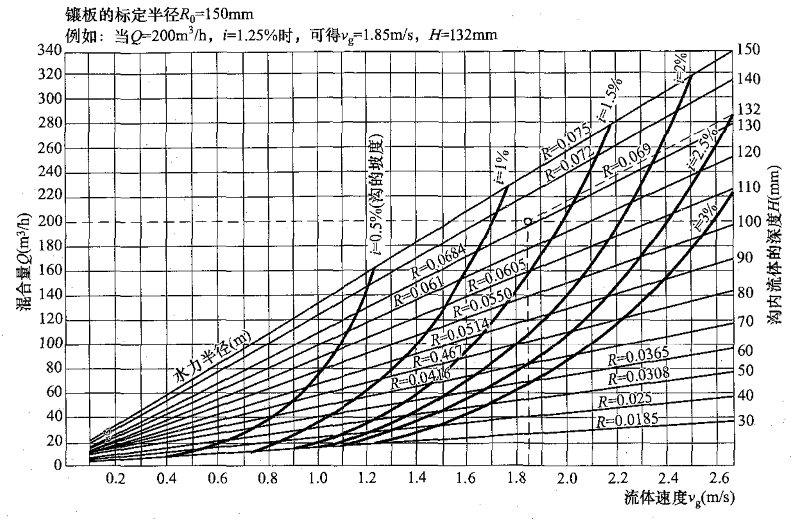



图 3-26 灰渣沟镶板选型曲线（二）

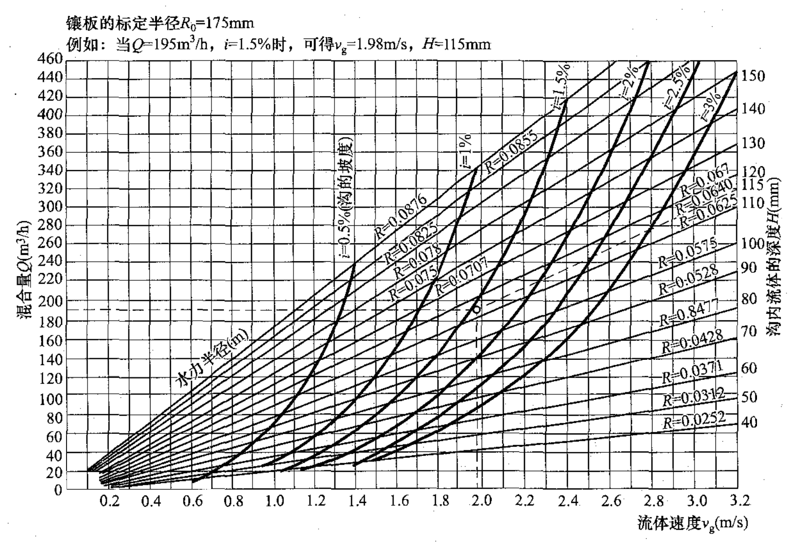



图 3-27 灰渣沟镶板选型曲线（三）

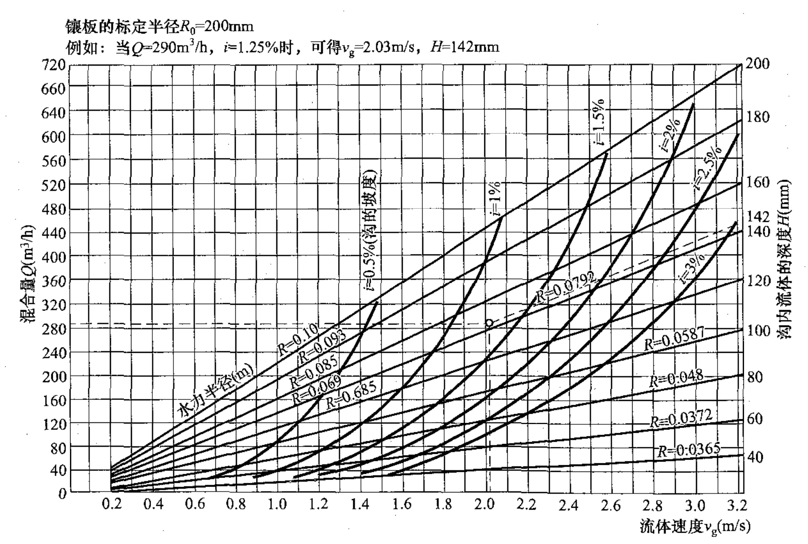



图 3-28 灰渣沟镶板选型曲线（四）

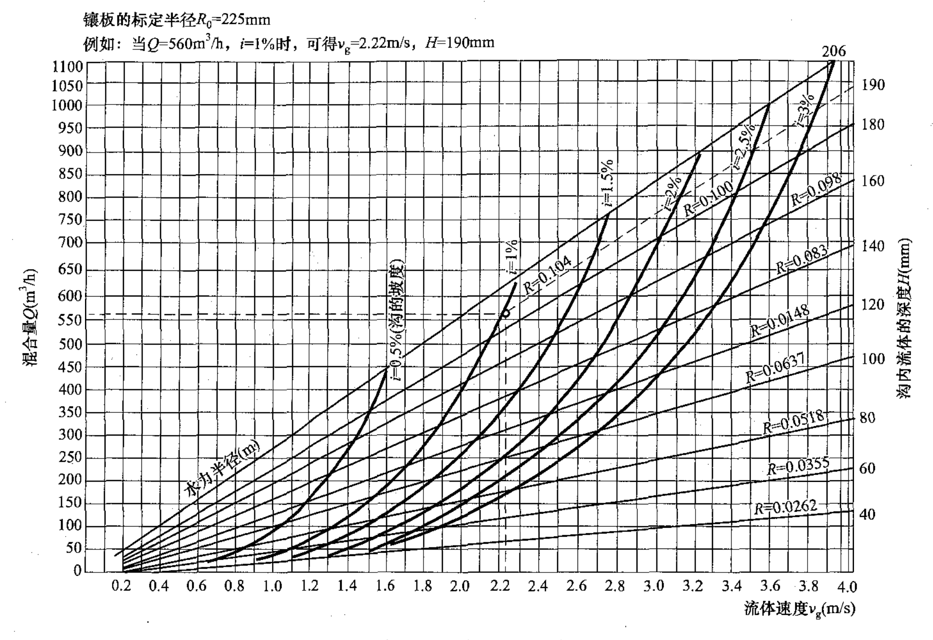



图 3-29　灰渣沟镶板选型曲线（五）

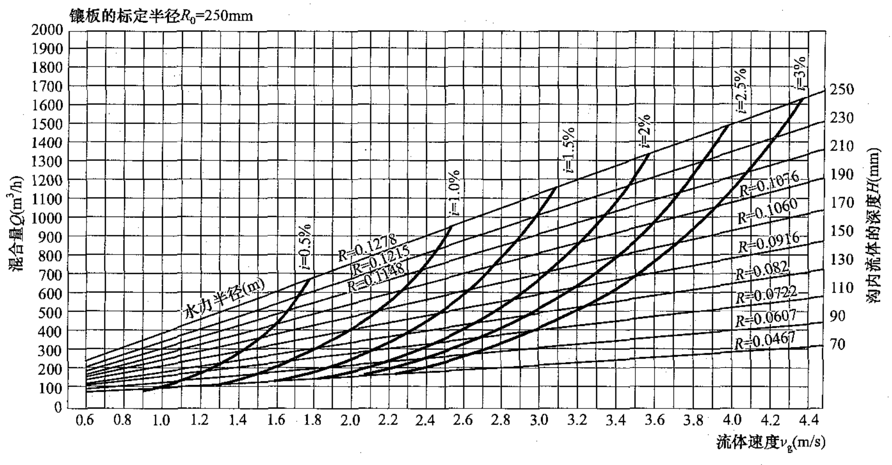



图 3-30　灰渣沟镶板选型曲线（六）

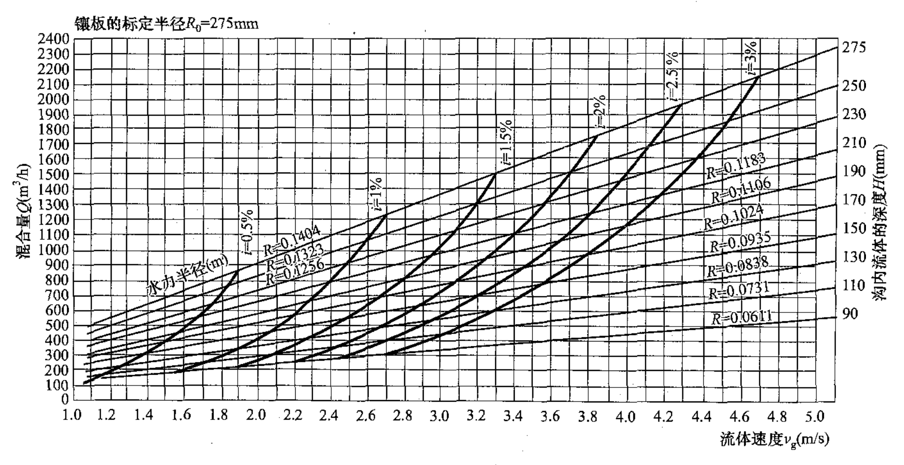



图 3-31　灰渣沟镶板选型曲线（七）

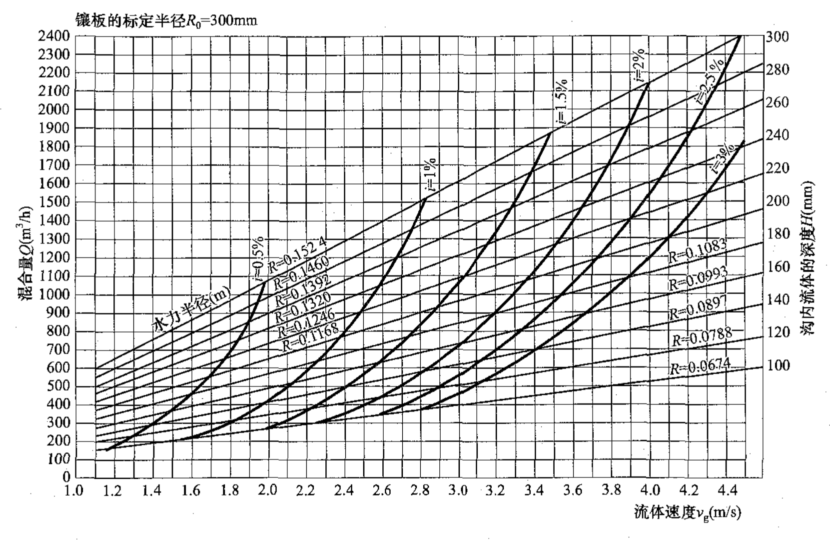



图 3-32　灰渣沟镶板选型曲线（八）

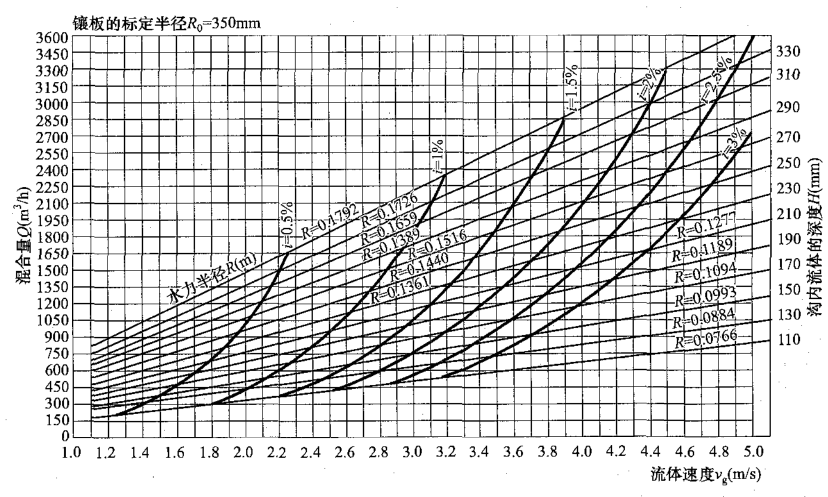



图 3-33　灰渣沟镶板选型曲线（九）

## 三、布置设计

（1）除灰渣系统的灰渣沟不设备用。

（2）灰沟的坡度不小于 1%；固态渣沟的坡度不小于 1.5%；液态渣沟坡度不小于 2%。输送高浓度灰渣浆的灰渣沟，其坡度可宜适当加大。

（3）灰渣沟布置应力求短而直，并考虑扩建时便于连接，沟底应采用铸石等耐磨镶板衬砌。

（4）渣沟的起始深度不应小于 500mm，灰沟起始深度不应小于 400mm。灰渣沟起始点与灰渣进入口的距离宜为 2～3m。

（5）当采用水封式排渣斗时，可适当加深灰渣沟起始深度或采用加设围堰的措施。

（6）灰渣沟的曲率半径应不小于 2m。

（7）灰渣沟的设计应考虑安装和检修时更换镶板的方便，在距灰渣沟底 500mm 的两侧壁处应设台阶，台阶宽度不宜小于 100mm。当镶板半径 $R_0$=125～350mm 时，可以按照表 3-20 及图 3-34 确定沟宽尺寸。

**表 3-20　　灰渣沟断面尺寸　　（mm）**

<table>
<tr><th>$R_0$</th><th>$A$</th><th>$B$</th><th>$B_1$</th><th>$H_1$</th></tr>
<tr><td>125</td><td rowspan="3">500</td><td>370</td><td>260</td><td rowspan="4">260</td></tr>
<tr><td>150</td><td>415</td><td>290</td></tr>
<tr><td>175</td><td>470</td><td>310</td></tr>
<tr><td>200</td><td rowspan="2">600</td><td>490</td><td>400</td></tr>
<tr><td>225</td><td>570</td><td>430</td><td rowspan="3">335</td></tr>
<tr><td>250</td><td rowspan="2">700</td><td>620</td><td>450</td></tr>
<tr><td>275</td><td>670</td><td>470</td></tr>
<tr><td>300</td><td rowspan="2">900</td><td>740</td><td>490</td><td>360</td></tr>
<tr><td>350</td><td>840</td><td>540</td><td>395</td></tr>
</table>

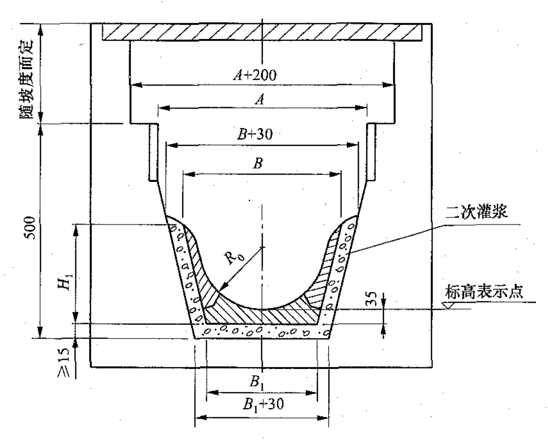


图 3-34 灰渣沟及镶板断面图

（8）灰渣沟的深度大于 2.5m 时，可采用灰渣沟隧道。在隧道内应沿灰渣沟的一侧设有宽度为 600～800mm、高度为 2m 的通道。隧道内应设有通风和照明设施。

（9）灰渣沟支沟汇入主沟时，如有跌落，其落差应大于主沟侧面镶板的高度，两主沟相交处不宜设跌落。

（10）灰渣沟上部与其他地下设施交叉时，交叉长度不宜超过 2m。当交叉长度小于 1.2m 时，沟底与其他地下设施底部之间的净空应大于 500mm；当交叉长度为 1.2～2m 时，其净空应大于 800mm。

（11）灰渣沟应装设盖板。在排渣口和落灰口前后及装设激流喷嘴处，则应装设轻便型盖板。

（12）在灰渣沟起始点、每个落灰渣口前 1.5～2.0m 处、灰渣沟相交和转弯处，宜装设激流喷嘴。在直沟段内装设喷嘴的间距可参照表 3-21 选取，对于坡度较大的灰渣沟及灰渣沟的末段，可视需要装设喷嘴。

**表 3-21　灰渣沟直沟段装设激流喷嘴的间距**

| 项　目 | 灰沟 | | 渣沟 | 液态渣沟 |
|---|---|---|---|---|
| 喷嘴前水压（MPa） | 0.8 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |
| 喷嘴间距（m） | 25 | 15 | 20 | 10 |

（13）灰渣沟内的激流喷嘴中心线应与沟道中心线相一致，并向下倾斜 8°～10°，喷嘴出口距灰渣沟沟底的高度 $H$：当 $R_0$=125～225mm 时，$H$=250mm；当 $R_0$=250～350mm 时，$H$=350mm。

（14）为了便于检修激流喷嘴，在每个激流喷嘴前应装设阀门。阀门和冲洗水母管不宜敷设在灰渣沟内，并应根据气象条件考虑防冻措施。

（15）在锅炉排渣设备落渣口处未装碎渣机时，应装设格栅，格栅孔眼尺寸可按输送系统和设备对粒度的要求确定。

# 第三节　水力喷射器输送系统

## 一、系统简介

水力喷射器输送系统主要用于锅炉排渣。设计范围是从锅炉炉膛下联箱水封板出口至储存设施入口。系统功能是将锅炉炉膛排出的热渣在水封排渣斗进行粒化、冷却、收集，并将渣通过碎渣机破碎，由水力喷射器经管道输送至脱水仓或灰渣浆池。系统主要包括水力喷射器、碎渣机、高压水泵、管道和阀门等。石子煤排放也可采用水力喷射器输送系统输送。

典型的水力喷射器输送系统见图 3-35。

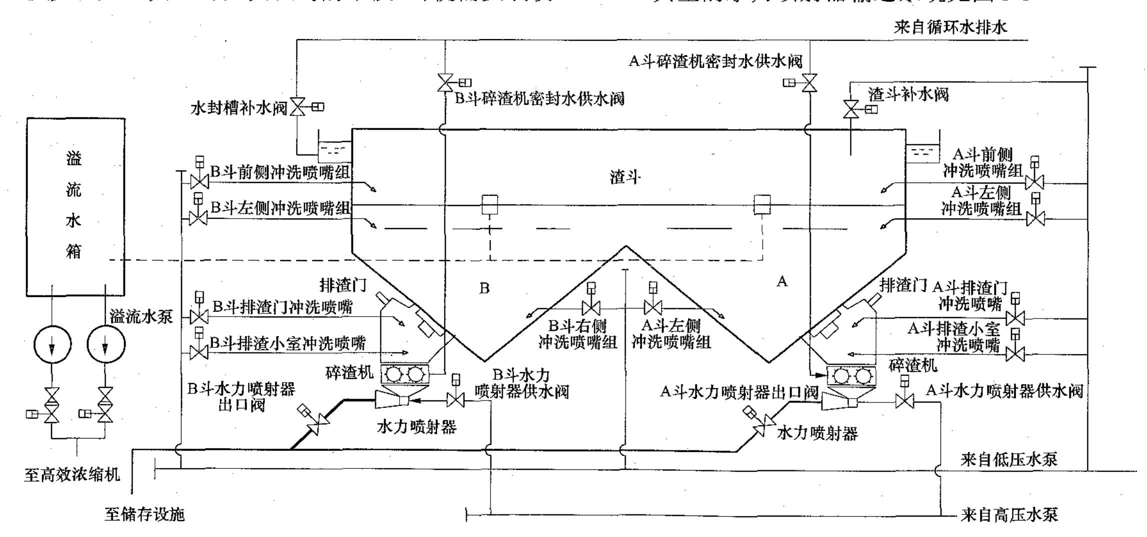


图 3-35　典型的水力喷射器输送系统图

## 二、设计要求

（1）水力喷射器的选择应根据输送管道的阻力、灰渣性质及其输送量等因素确定。排渣用的水力喷射器宜安装在锅炉碎渣机下方，不设备用，其出力应能在1.5～2h内将锅炉8h的存渣量送出，灰渣管内浆体质量浓度宜为15%～18%。排石子煤用的水力喷射器其出力宜在1h内输送锅炉最大连续蒸发量时8h的石子煤量。输送管道内浆体质量浓度宜为11%～13%。

（2）水力喷射器出口处的灰渣管道应有大于5倍管径的直管段。

（3）水力喷射器宜采用地面布置，当其布置在沟道内时，在安装手孔的上方应设有轻便盖板，供维护和检修用。

（4）输送石子煤时，管道内混合物流速不应低于2.7m/s。水力输送距离不宜大于150m，高差不宜大于15m。输送管道应采用耐磨材质。

（5）输渣时，管道内混合物流速不低于1.8m/s。

## 三、设计计算

1. 碎渣机出力

水力喷射器一般采用定期运行方式，根据锅炉渣量及排渣周期，选择碎渣机出力及运行时间。排渣用的水力喷射器出力宜在1.5～2h内输送锅炉最大连续蒸发量时8h的排渣量，其中包括管道切换和冲洗时间，对应的碎渣机出力为6～8倍的渣量。

2. 确定管径

（1）混合物流量

$$G_{zs}=\frac{G_z}{\rho_z}+\frac{G_{sh}}{\rho_{sh}} \tag{3-27}$$

式中 $G_{zs}$——渣水混合物流量，$m^3/h$；

$G_z$——碎渣机出力，t/h；

$\rho_z$——渣的真实密度，$t/m^3$，可按附录B选取；

$G_{sh}$——渣水混合物中清水质量，t/h，渣水比按1:4～5确定；

$\rho_{sh}$——清水密度，$t/m^3$。

（2）假定流速。管内流速按渣管$v\geqslant 1.8$m/s，石子煤管道$v\geqslant 2.7$m/s选取。

（3）确定管道内径

$$d_j=\sqrt{\frac{4G_{zs}}{3600\pi v}}=0.0188\sqrt{\frac{G_{zs}}{v}} \tag{3-28}$$

式中 $d_j$——计算管径，m；

$v$——管道流速，m/s。

根据$d_j$选用标准的耐磨管道。对于输渣和石子煤的管道，建议选择耐磨钢管。按选用的耐磨管道计算出管道内径$d_n$。

（4）校核流速。根据选定的管道内径$d_n$，校核管道内浆体的实际流速，即

$$v'=\frac{4G_{zs}}{3600\pi d_n^2} \tag{3-29}$$

式中 $v'$——管道内浆体的实际流速，m/s；

$d_n$——根据计算内径选用标准管道后的渣管、石子煤管内径，m。

3. 确定管道阻力$H$（每千米的阻力）

（1）用威连汉司公式确定管道阻力$\Delta H$，即

$$\Delta H=\left[2.083\times\left(\frac{100}{\varepsilon}\right)^{1.85}\times\frac{(4.4G_{zs})^{1.85}}{\left(\frac{d_n\times 1000}{25.4}\right)^{4.865}}\right]/100 \tag{3-30}$$

式中 $\Delta H$——每千米管道的阻力，MPa/km；

$\varepsilon$——管道的表面粗糙度系数，渣及石子煤为140，灰为120，渣水混合物温度为15℃时按100%计，40～100℃增加20%，15℃以下减少20%。

（2）确定管长

$$L_{eq}=(L_1+L_2)\times 10^{-3} \tag{3-31}$$

式中 $L_{eq}$——管道当量长度，km；

$L_1$——实际管长，m，包括水平段和垂直提升段；

$L_2$——弯头、阀门的当量长度，m。

弯头、阀门的当量长度选取原则：一个90°弯头的当量长度为2.68m，一个45°弯头的当量长度为1.74m，一个22.5°弯头当量长度为1.22m，一个阀门的当量长度为1.31m。

（3）水平管道阻力

$$H_1=\Delta H L_{eq} \tag{3-32}$$

式中 $H_1$——水平管道阻力，MPa；

$\Delta H$——管道的阻力，MPa/km，见式（3-30）；

$L_{eq}$——管道当量长度，km，见式（3-31）。

4. 确定静压差

（1）当锅炉渣斗满斗时

$$H_2'=(l_1-l_2)\rho_{hz}/100 \tag{3-33}$$

式中 $H_2'$——渣斗满斗时的静压差，MPa；

$l_1$——管道最高点与水力喷射器中心之差，m，如图3-36所示；

$l_2$——渣斗内渣与水力喷射器中心之差，m，如图3-36所示；

$\rho_{hz}$——渣浆密度，$t/m^3$。

（2）当锅炉渣斗空斗时

$$H_2''=(l_1-l_2)\rho_{hz}/100 \tag{3-34}$$

式中 $H_2''$——渣斗空斗时的静压差，MPa。

因（$l_2$）渣斗空斗时渣斗内渣与水力喷射器中心之差小于满斗时，故 $H_2''>H_2'$，则取 $H_2=H_2''$，管道总阻力 $H_z=H_1+H_2$（MPa）。

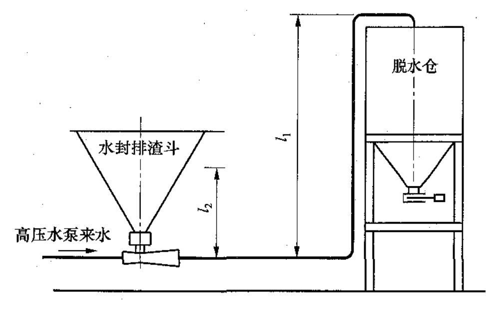



图 3-36　水力喷射器输送系统简图

5. 选择水力喷射器

（1）初步选型。由管道总阻力 $H_z$ 和渣水混合物流量 $G_{zs}$ 选用水力喷射器，查表（查特性曲线）选取喉部尺寸、喷嘴尺寸。由特性曲线查得其喷射水量 $Q_p$ 和喷射水压力 $p_p$。按制造厂提供的曲线选择水力喷射器，依照图 3-37 的查图方法，查出 $e$ 点，可求得水力喷射器各项参数。如果没有获得制造厂提供的曲线，可以参照图 3-40～图 3-58 的曲线查取。

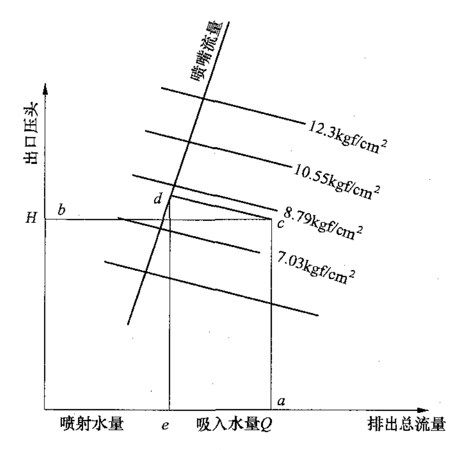



图 3-37　水力喷射器选型曲线查图实例

可以在多张曲线中试查，进行比较，选择合适的水力喷射器。水力喷射器选型计算中的符号意义见图 3-38。其中 $p_{zs}=H_z$；$G_x=G_{zs}-Q_p$。

（2）校核喷射水流量 $Q_p$ 和喷射水压力 $p_p$。水力喷射器选型完成后应对喷射水流量 $Q_p$ 和喷射水压力 $p_p$ 进行校核计算，选出的 $Q_p$ 和 $p_p$ 必须满足以下两个条件：

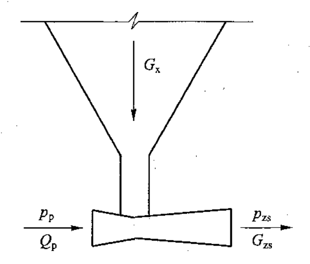



图 3-38　水力喷射器各技术参数之间关系图

1）效率 $\eta$ 应在 25%～40%内，即

$$\eta=\frac{p_{zs}G_{zs}\rho_{hz}}{p_pQ_p} \tag{3-35}$$

2）应满足 $G_{xi}\geqslant G_{xmin}$。最小吸入量 $G_{xmin}$ 按式（3-36）计算

$$G_{xmin}=\frac{G_z}{1.43}\times 2\ （空隙率）+Q_{zf} \tag{3-36}$$

式中　$G_{xmin}$——最小吸入量，$m^3/h$；

$G_z$——碎渣机出力，t/h；

$Q_{zf}$——碎渣机轴封水量，$m^3/h$；

1.43——渣的堆积密度，$t/m^3$。

若 $G_{xi}\geqslant G_{xmin}$ 则满足要求。否则，需重新选取不同的水力喷射器（即不同喉部尺寸或不同喷嘴直径）试算，直到满足上述两个条件为止。

## 四、水力喷射器选型

1. 工作原理和结构特点

（1）工作原理。高压喷射水通过工作喷嘴，喷射水的压力能转换成速度能，使混合室产生负压，将渣水混合物吸入混合室与之混合，然后转换成压力能排出，进入灰渣管道。

（2）结构特点。

1）水力喷射器采用切线进料方式，混合能量损失小，且不易发生堵塞。

2）根据物料在喷射器内部不同区域的磨损情况，水力喷射器各部件分别采用不同的耐磨材料，使得总体寿命得以延长。

典型水力喷射器结构示意见图 3-39。水力喷射器各部件材料见表 3-22。

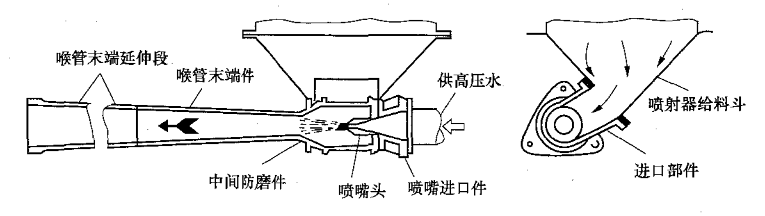



图 3-39　典型水力喷射器结构示意图

表 3-22 水力喷射器各部件材料

| 编号 | 零件名称 | 材 料 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 喷嘴进口法兰 | 球墨铸铁 |
| 2 | 喷嘴头 | 不锈钢 |
| 3 | 喷射器本体 | 球墨铸铁 |
| 4 | 法兰 | 球墨铸铁 |
| 5 | 喉管末端件 | 镍铬合金铸铁 |
| 6 | 喉管末端延伸件 | 铁铬合金灰口铸铁 |

2. 主要技术参数及规格

表 3-23 为常用的水力喷射器主要技术参数及规格。

表 3-23 常用的水力喷射器主要技术参数及规格

| 型 号 | SPB200×200 | SPB75×100 |
| --- | --- | --- |
| 进料口尺寸（mm） | 203×203 | 76 |
| 出料口尺寸（mm） | 197 | 102 |
| 进水口尺寸（mm） | 152 | 102 |
| 喷嘴直径（in/mm） | $1\sim2\frac{3}{8}$/ 25.4～63.5 | $\frac{2}{3}\sim1\frac{3}{8}$/ 16.9～34.9 |
| 喷嘴数（只） | 1 | 1 |
| 最高供水压力（MPa） | 2.45 | 2.45 |
| 质量（kg） | 318 | 238 |

3. 水力喷射器曲线

水力喷射器参考曲线见图 3-40～图 3-58（图中 $1kgf/cm^2=9.80665\times10^4Pa$，$100PSI=7.03kgf/cm^2$）。

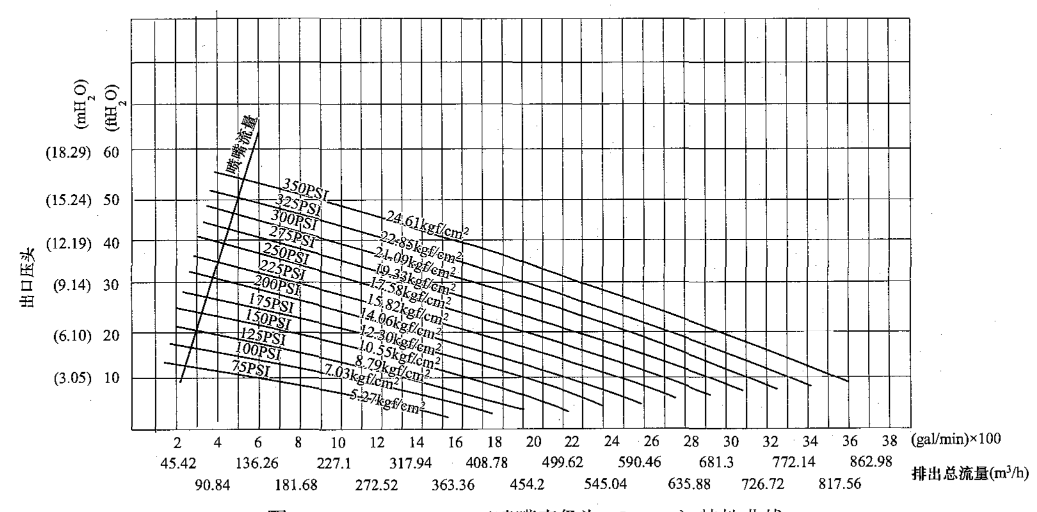



图 3-40 SPB200×200（喷嘴直径为 25.4mm）特性曲线

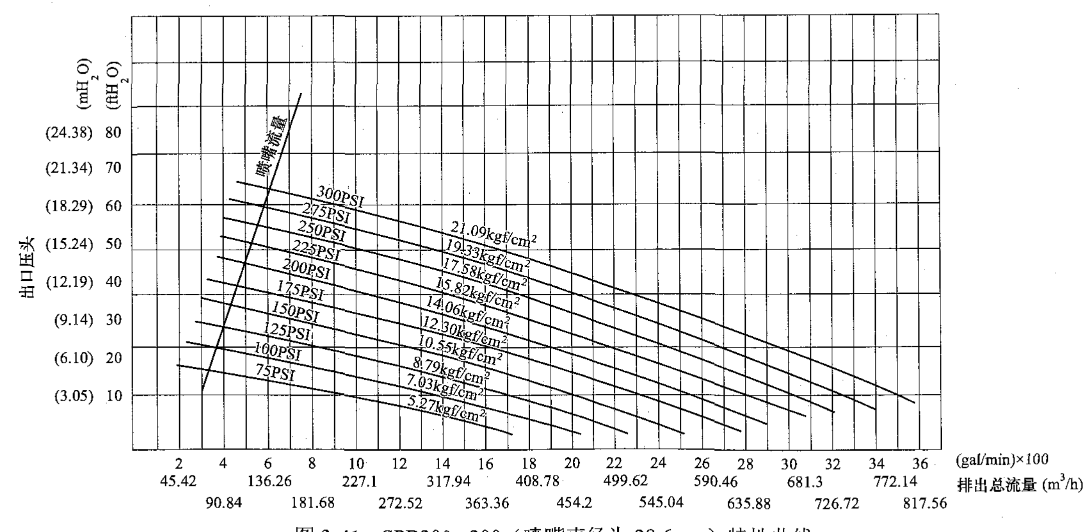



图 3-41 SPB200×200（喷嘴直径为 28.6mm）特性曲线

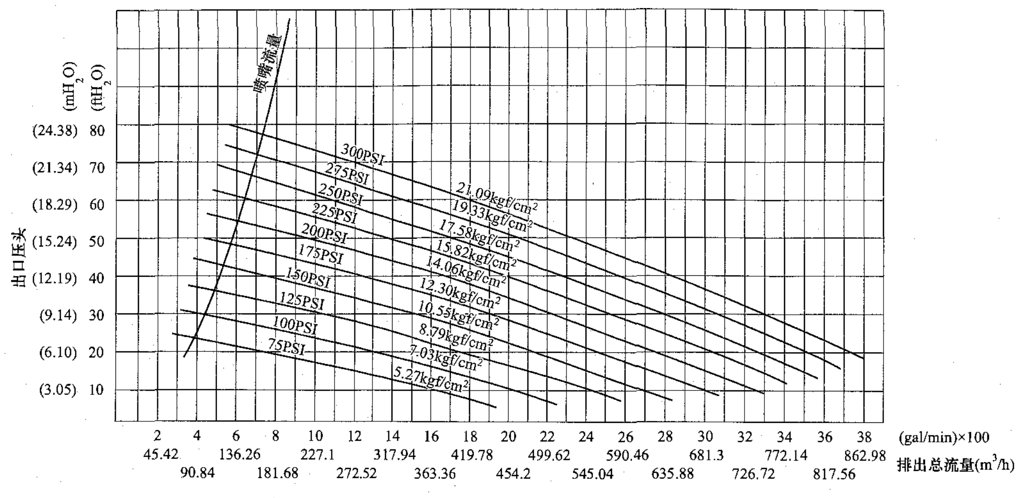



图 3-42　SPB200×200（喷嘴直径为 31.8mm）特性曲线

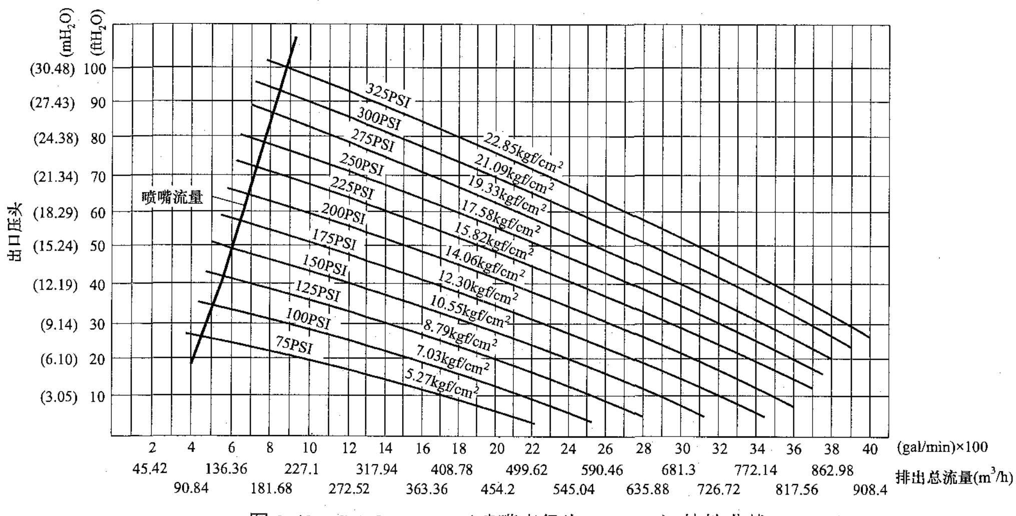



图 3-43　SPB200×200（喷嘴直径为 34.9mm）特性曲线

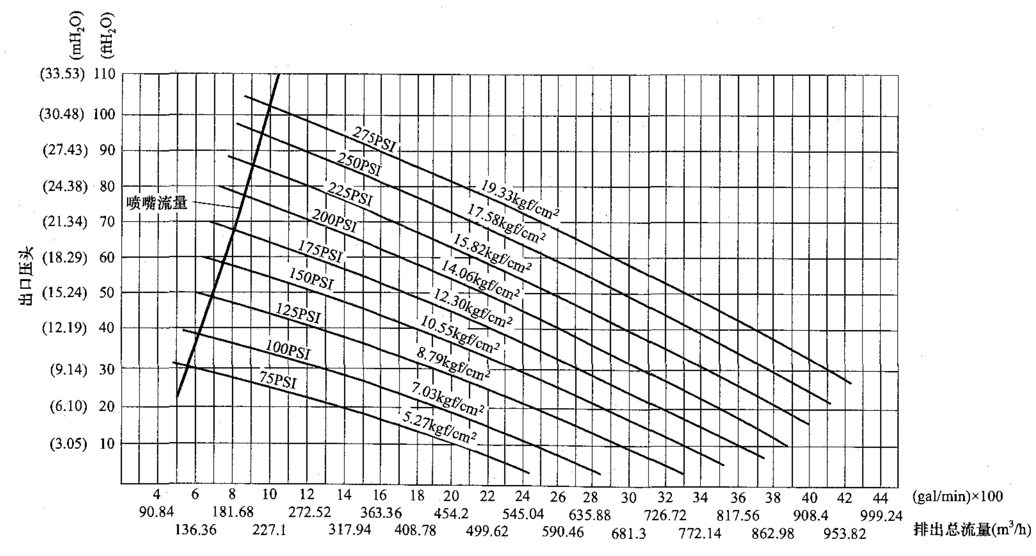



图 3-44　SPB200×200（喷嘴直径为 38.1mm）特性曲线

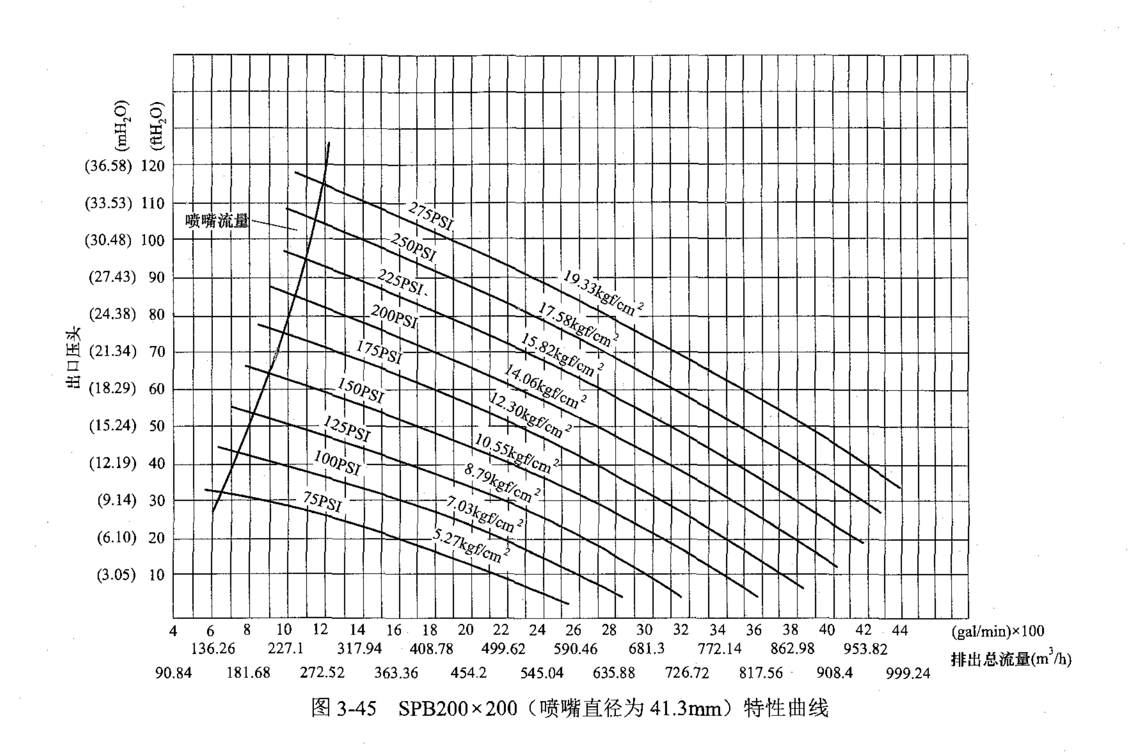



图 3-45 SPB200×200（喷嘴直径为 41.3mm）特性曲线

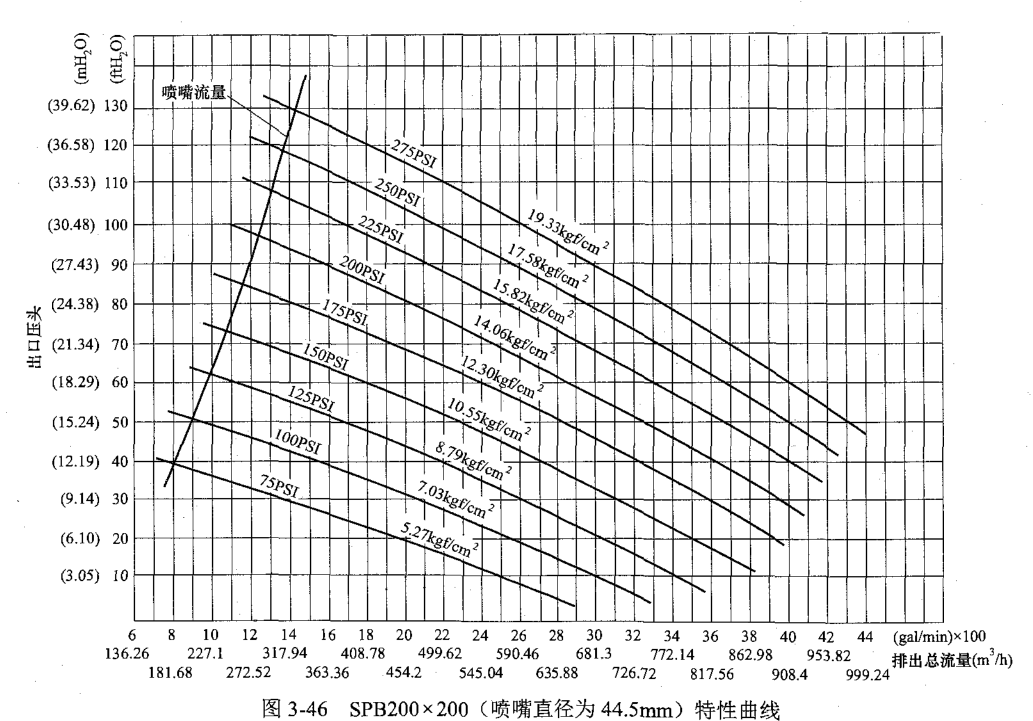



图 3-46 SPB200×200（喷嘴直径为 44.5mm）特性曲线

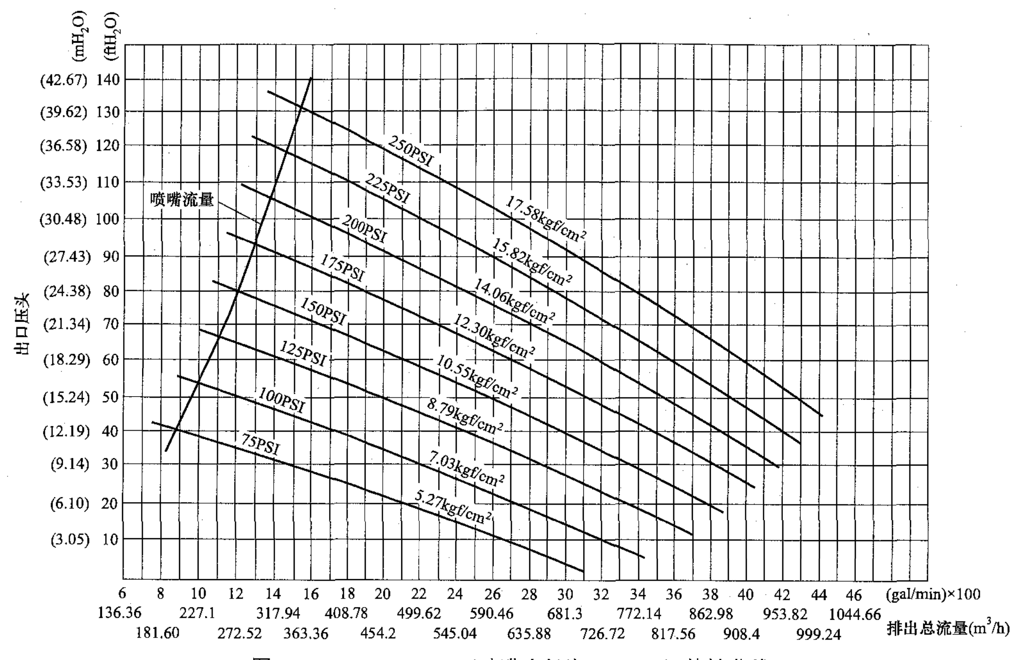



图 3-47　SPB200×200（喷嘴直径为 47.6mm）特性曲线

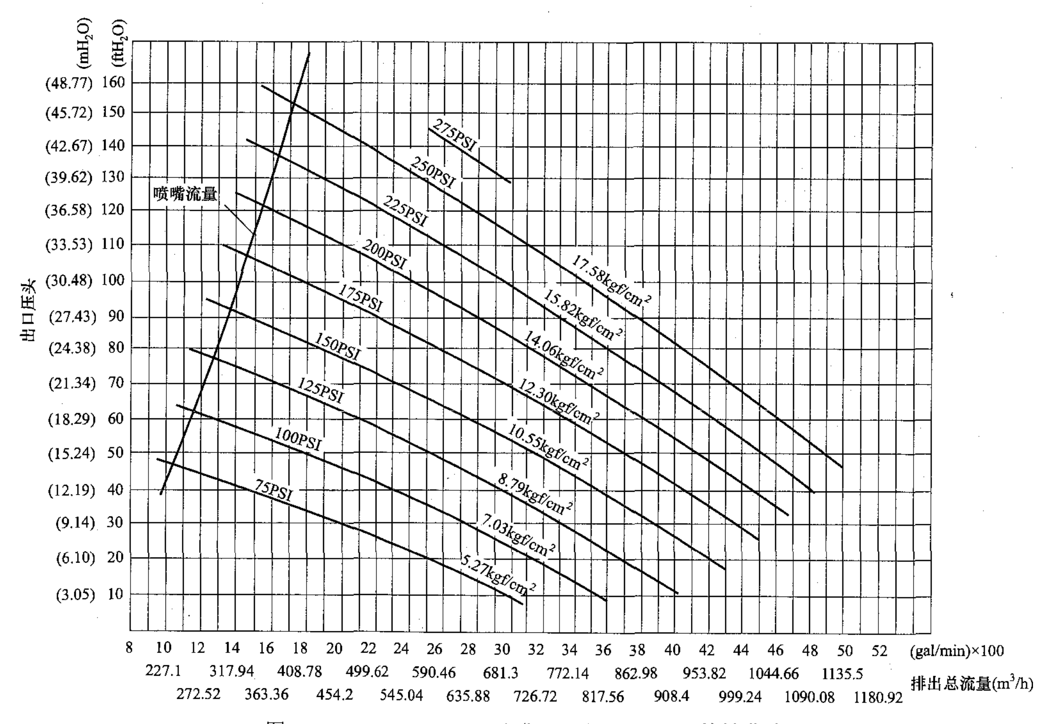



图 3-48　SPB200×200（喷嘴直径为 50.8mm）特性曲线

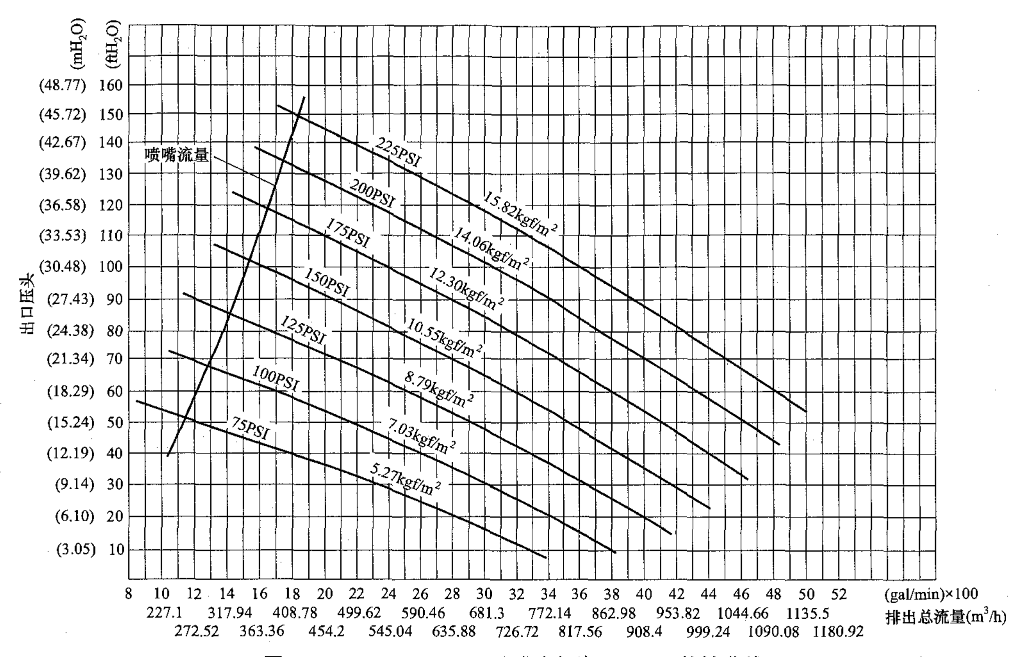



图 3-49 SPB200×200（喷嘴直径为 54mm）特性曲线

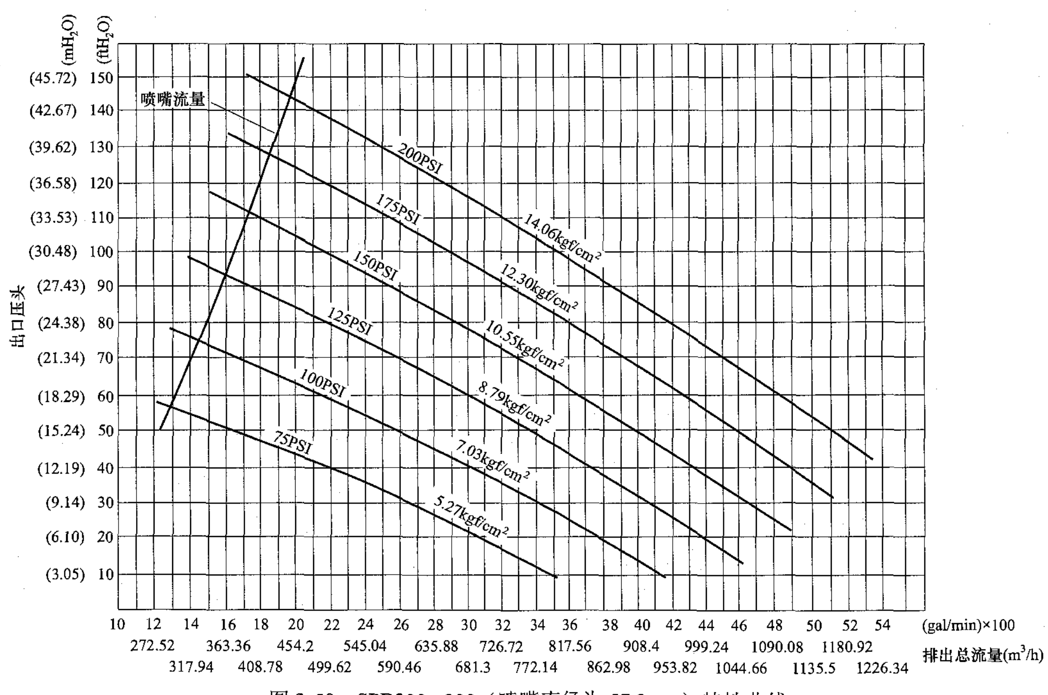



图 3-50 SPB200×200（喷嘴直径为 57.2mm）特性曲线

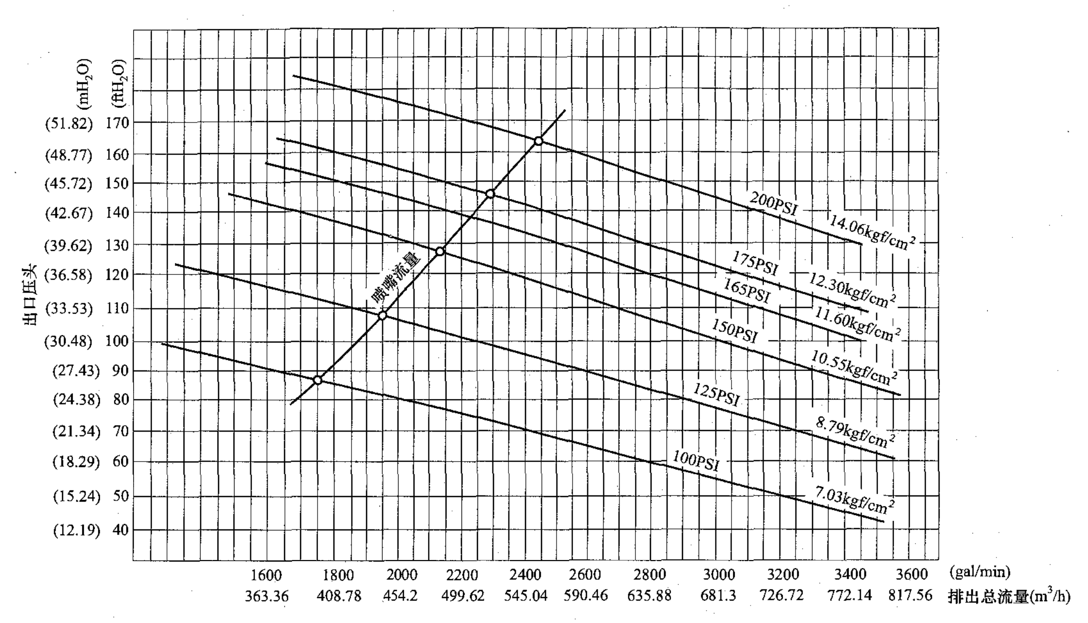



图 3-51 SPB200×200（喷嘴直径为 63.5mm）特性曲线

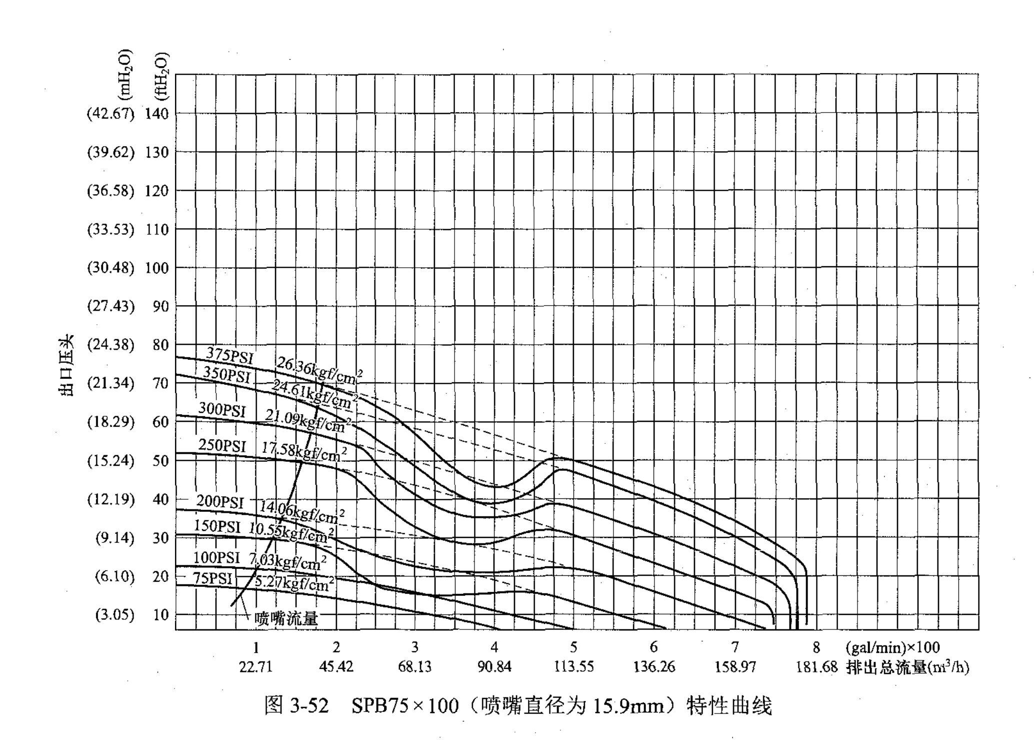



图 3-52 SPB75×100（喷嘴直径为 15.9mm）特性曲线

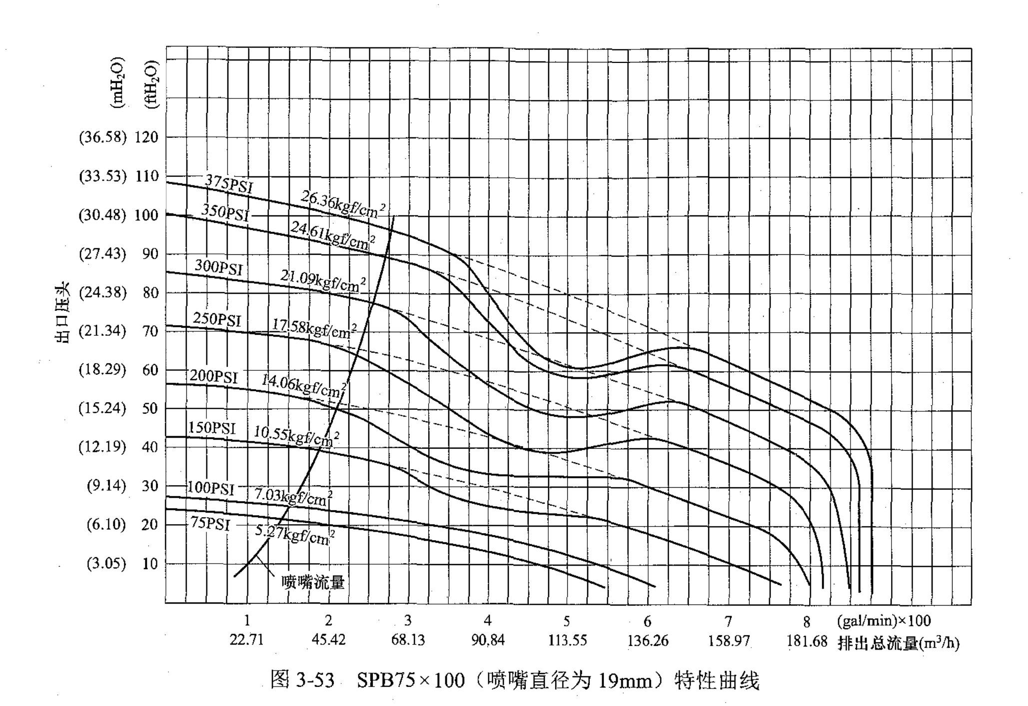



图 3-53　SPB75×100（喷嘴直径为 19mm）特性曲线

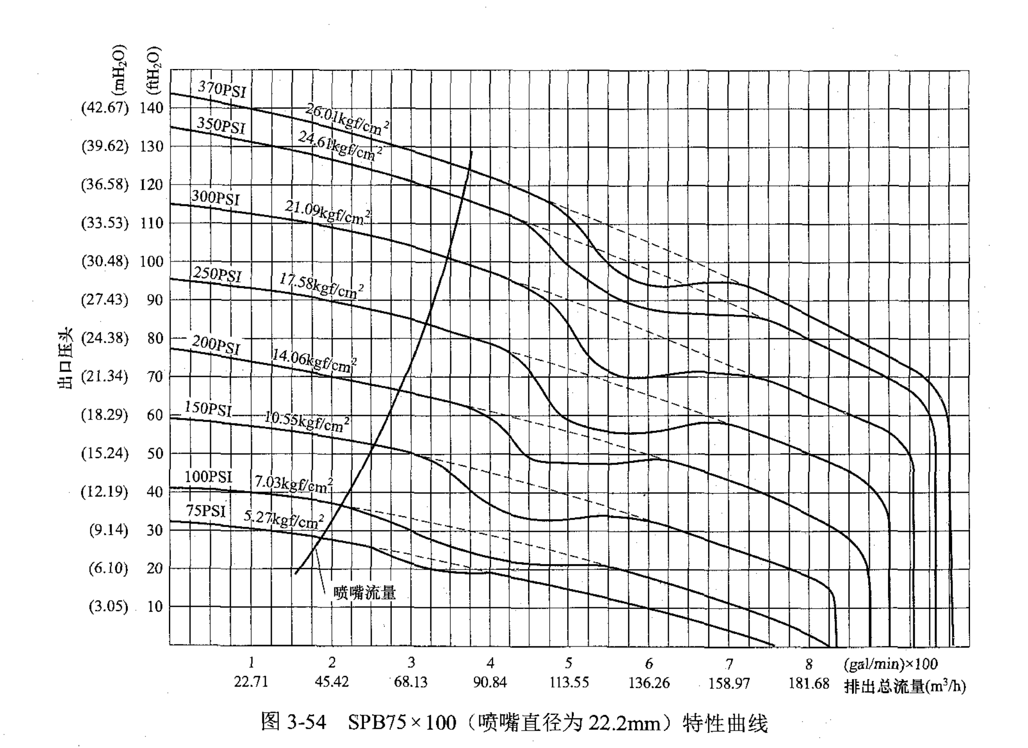



图 3-54　SPB75×100（喷嘴直径为 22.2mm）特性曲线

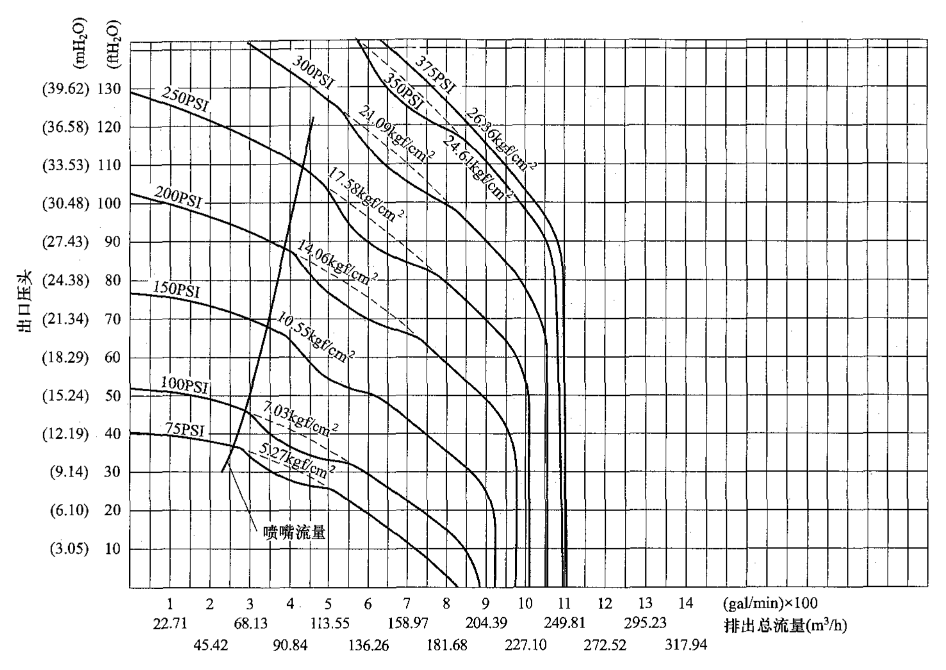



图 3-55　SPB75×100（喷嘴直径为 25.4mm）特性曲线

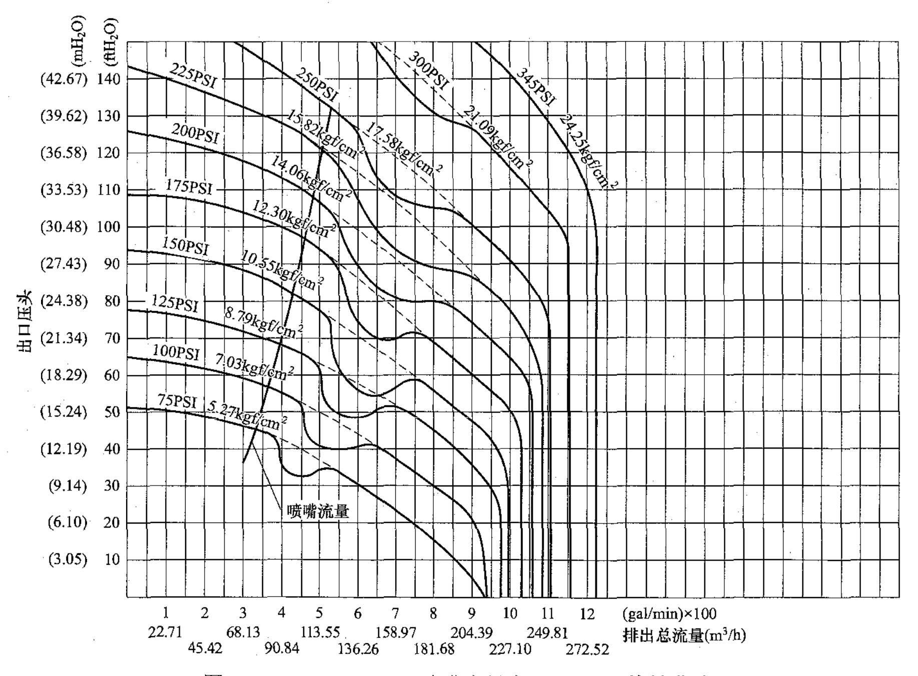



图 3-56　SPB75×100（喷嘴直径为 28.6mm）特性曲线

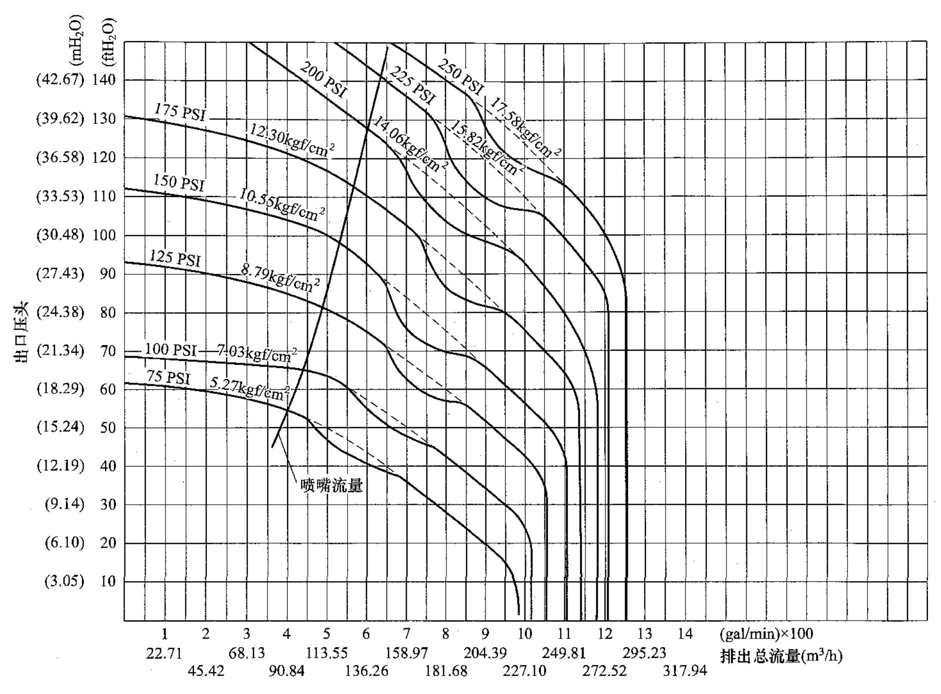



图 3-57 SPB75×100（喷嘴直径为 31.8mm）特性曲线

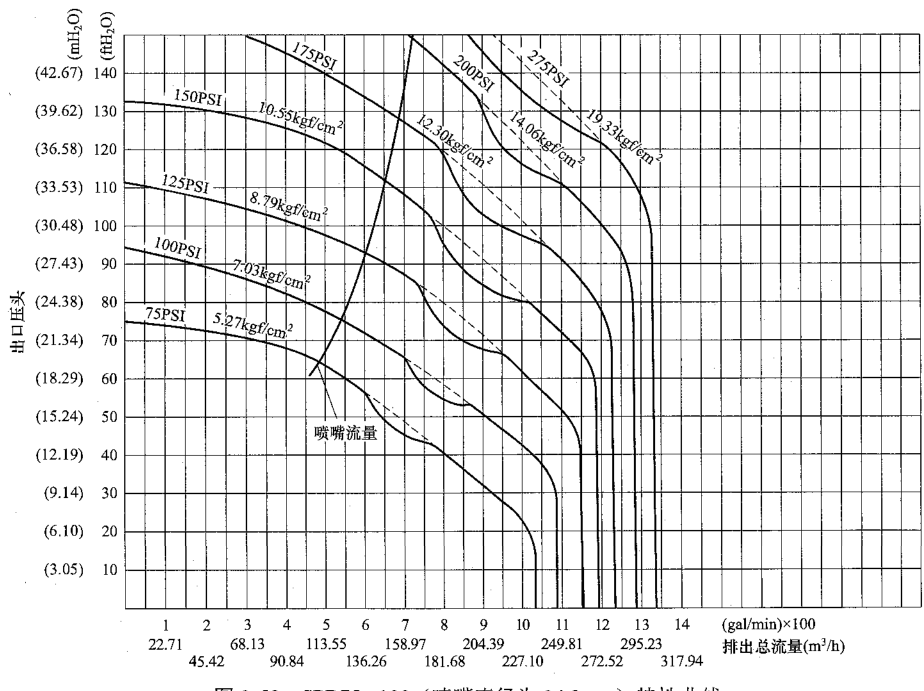



图 3-58 SPB75×100（喷嘴直径为 34.9mm）特性曲线

## 五、布置设计

典型的水力喷射器布置见图 3-59 和图 3-60。

## 六、计算举例

某工程锅炉排渣采用水力喷射器输送到灰渣泵房的前池，最终通过灰渣泵输送至水灰场贮存。该工程水力喷射器布置示意如图 3-59 所示，水力喷射器安装详图如图 3-60 所示。

该工程的水力喷射器计算及选型成果见表 3-24。

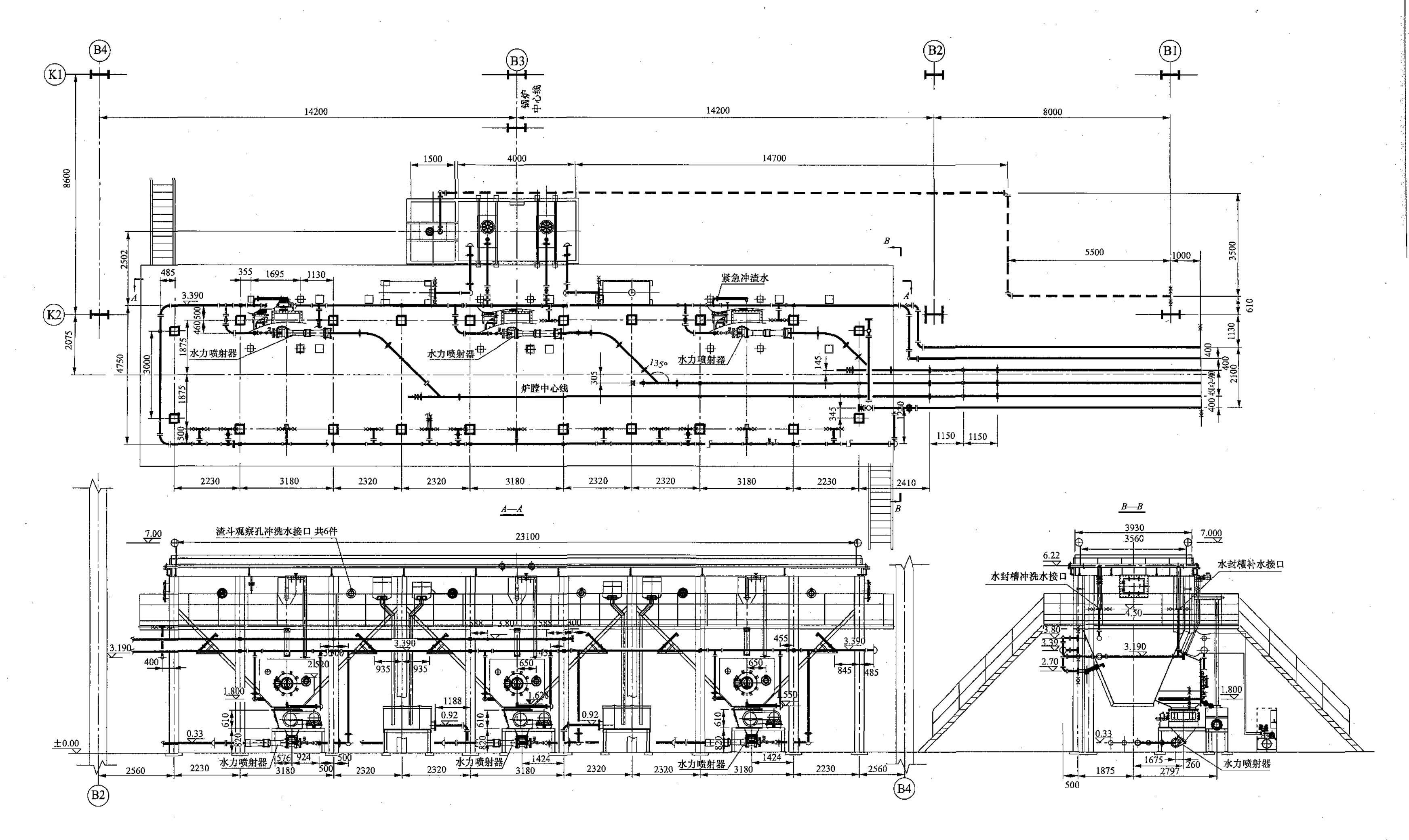



图 3-59　典型的水力喷射器布置图

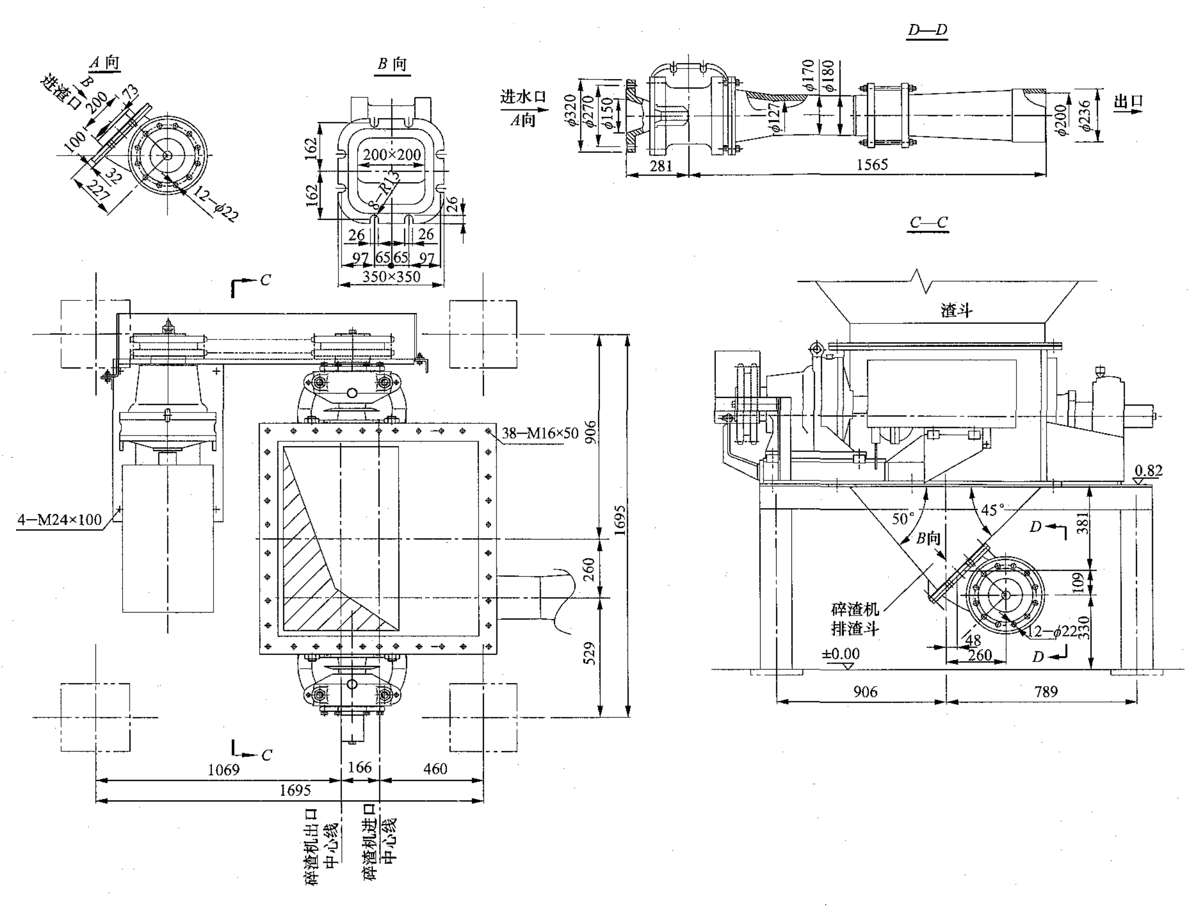



图 3-60 SPB200×200（喷嘴直径为 34.9mm）安装详图

表 3-24 某工程水力喷射器计算及选型成果表

| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 设计原始资料 | | | | | |
| 1.1 | 每班运行小时数 | $t$ | h | 一班按 8h 考虑，运行 1.75h | 1.75 | |
| 1.2 | 渣量 | $G$ | t/h | | 10.33 | |
| 1.3 | 输送出力 | $G_1$ | t/h | $G_1=(G\times 8)/t$ | 47.22 | |
| 1.4 | 碎渣机出力 | $G_z$ | t/h | 按 $G_1$ 的数值选取 | 50 | |
| 1.5 | 水渣比 | $r$ | kg/kg | | 4 | |
| 1.6 | 渣真实密度 | $\rho_z$ | t/m³ | 按规程选取 | 2.3 | |
| 2 | 混合物流量 | $G_{zs}$ | m³/h | $G_{zs}=(G_z/\rho_z)+(G_z r/\rho_{sh})$ | 221.74 | 式（3-27） |

续表

| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 假定输送流速 | $v_1$ | m/s | 按规程选取 | 1.8 | |
| 4 | 计算管径 | $d_j$ | m | $[(4G_{zs})/(3600\pi v_1)]^{1/2}$ | 0.2088 | 式（3-28） |
| 5 | 输送管径内径 | $d_n$ | mm | 根据样本选取$\phi$219×8 | 0.203 | |
| 6 | 校核流速 | $v$ | m/s | $v=(4G_{zs})/(3600\pi\, d_n^2)$ | 1.90 | 式（3-29） |
| 7 | 计算管道阻力 | | | | | |
| 7.1 | 每千米管道阻力 | $\Delta H$ | MPa | 用威廉汉司公式：$[2.083(100/\varepsilon)^{1.85}(4.4G_{zs})^{1.85}/(d_n\times1000/25.4)^{4.865}]/100$（其中$\varepsilon$为 140） | 0.1539 | 式（3-30） |
| 7.2 | 确定管道当量长度 | | | | | |
| a） | 管道实际长度 | $L_1$ | m | 按管路布置路线确定 | 60 | |
| b） | 90°弯头个数 | $n_1$ | 个 | | 4 | |
| c） | 45°弯头个数 | $n_2$ | 个 | | 2 | |
| d） | 相关附件当量长度 | $L_2$ | m | 1 个 90° 弯头当量长度 2.68m，1 个 45° 弯头当量长度 1.74m | 14.20 | |
| e） | 全部管线当量长度 | $L_{eq}$ | km | $L_{eq}=(L_1+L_2)\times10^{-3}$ | 0.0742 | 式（3-31） |
| 7.3 | 管道阻力 | $H_1$ | MPa | $H_1=\Delta HL_{eq}$ | 0.0114 | 式（3-32） |
| 7.4 | 确定静压差 | | | | | |
| a） | 进出口最大高差 | $h$ | m | 通过管线布置情况确定 | 4.1 | |
| b） | 渣浆密度 | $\rho$ | t/m³ | $\rho=(G_z+rG_2)/G_{zs}$ | 1.1275 | |
| c） | 静压差 | $H_2$ | MPa | $H_2=(\rho h)/100$ | 0.0462 | |
| 7.5 | 管道总阻力 | $H_z$ | MPa | $H_z=H_1+H_2$ | 0.0576 | |
| 8 | 水力喷射器的选择 | | | 方法：根据 $G_{zs}$ 和 $H_z$ 查水力喷射器特性曲线，查出水力喷射器的喉部尺寸、喷嘴尺寸、喷嘴流量 $Q_p$ 及喷嘴入口水压 $p_p$ | | |
| 8.1 | 水力喷射器特征性能 | | | | | |
| 8.1.1 | 水力喷射器喉部尺寸 | | mm | 选取 | $\phi$127 | |
| 8.1.2 | 水力喷射器喷嘴尺寸 | | mm | 选取 | $\phi$34.9 | |

续表

| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.1.3 | 喷嘴流量 | $Q_p$ | m³/h | 查特性曲线得 | 104.50 | |
| 8.1.4 | 喷嘴入口压力 | $p_p$ | MPa | 查特性曲线得 | 0.527 | |
| 8.2 | 校核水力喷射器选型 | | | 下面2个条件有一个不满足均需重新选 | | |
| a） | 条件1 | | | 喷射器效率在25%～40%范围内 | | |
| | 计算效率 | $\eta$ | % | $\eta=(H_z G_{zs}\times\rho)/(Q_p p_p)$ | 0.26 | 式（3-35） |
| | 条件1结果 | | | | 满足 | |
| b） | 条件2 | | | $G_x \geqslant G_{xmin}$ | | |
| | 计算吸入水量 | $G_x$ | m³/h | $G_x=G_{zs}-Q_p$ | 117.24 | |
| | 计算最小吸入量 | $G_{xmin}$ | m³/h | $G_{xmin}=(G_z/1.43)\times$空隙率+碎渣机等给料设备的轴封水（其中：空隙率取2，碎渣机等给料设备的轴封水取为10） | 79.93 | 式（3-36） |
| | 条件2结果 | | | | 满足 | |
| 2个条件都满足，计算、选型成功 | | | | | | |

## 第四节 灰渣浆泵输送系统

### 一、系统简介

灰渣浆泵输送系统通常有离心式灰渣泵输送系统和柱塞泵输送系统，其中离心式灰渣泵输送系统可输送灰浆、渣浆或灰渣浆，而柱塞泵输送系统通常只输送灰浆。系统主要由输送泵、管道、阀门和一些必需的仪表组成。其功能主要是利用灰渣泵和管道系统，将灰渣通过水力输送的方式送至储运设施。对于厂外输送系统，一般送至厂外的湿式贮灰场或渣场；对于厂内输送系统，一般输送至中转储存设施（如脱水仓等）。

设计范围：对于厂外输送系统，为灰渣浆前池起至灰渣浆泵房外1m灰渣管处；对于厂内输送系统，为灰渣浆前池起至中转储存设施（如脱水仓等）。

典型系统见图3-61～图3-63。

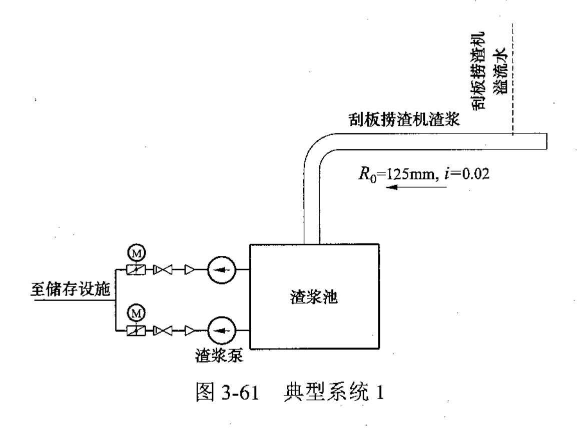



图3-61 典型系统1

### 二、设计要求

1. 离心式灰渣浆泵

（1）灰渣浆泵应根据灰渣管道阻力、灰渣浆量和制造厂提供的灰渣浆泵特性曲线选择。每台泵的流量不应小于计算灰渣浆量的110%；其扬程不应小于灰渣管道（灰渣浆量按计算值的100%计）计算阻力的110%～120%。

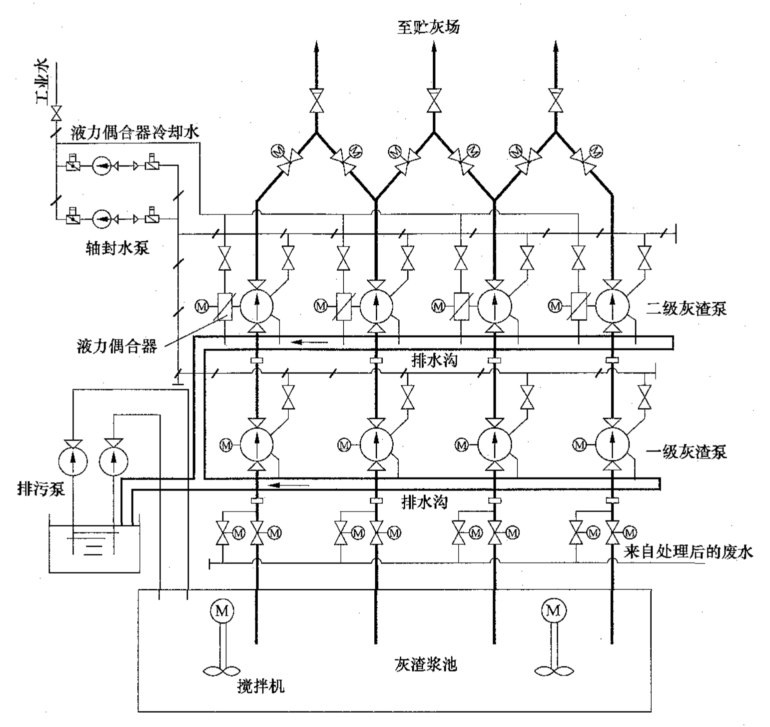



图 3-62　典型系统 2

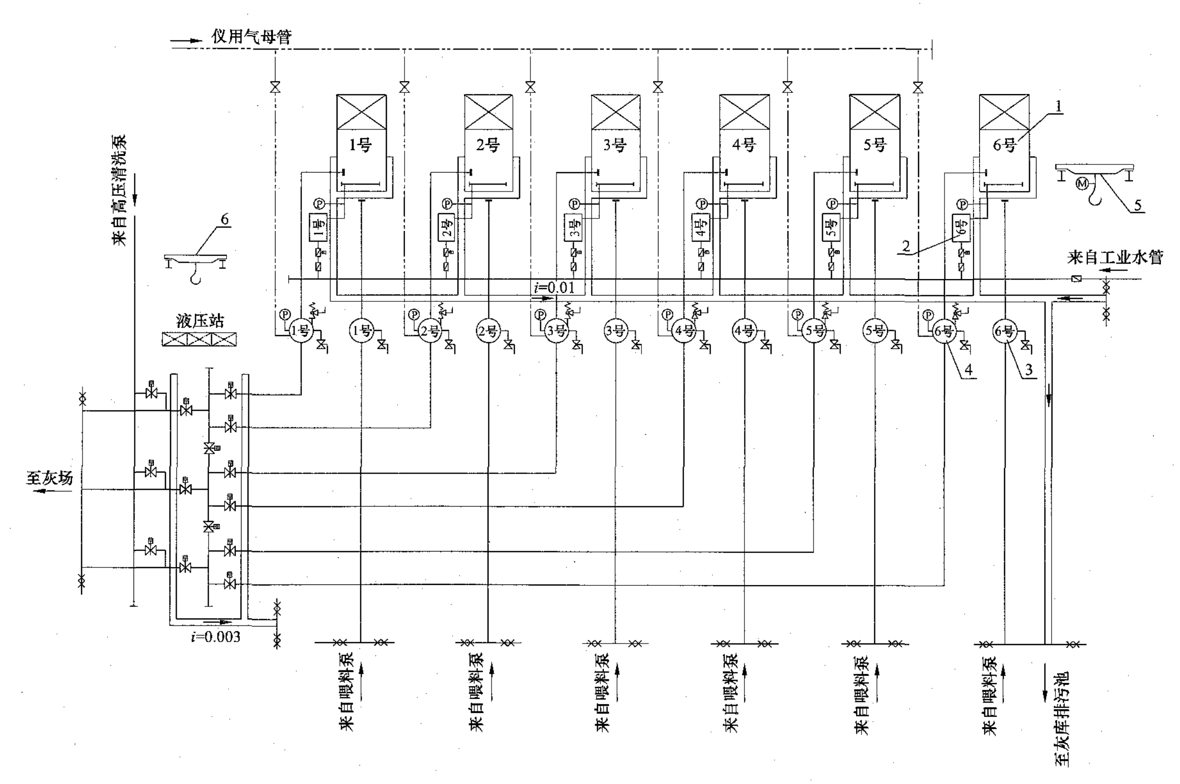



图 3-63　典型系统 3

1—柱塞泵；2—清水泵；3—入口缓冲罐；4—出口缓冲罐；5—电动单梁桥式起重机；6—手动单梁悬挂式起重机（用于阀门间）

（2）灰渣浆泵的备用台（组）数确定原则：1 台（组）运行时，设 1 台（组）备用；2～3 台（组）运行时，设 2 台（组）备用。

（3）灰渣浆泵需要轴封水时，应设专用的轴封水泵，其出口压力和流量应按制造厂家提供的资料选取，当未取得制造厂资料时，其出口压力可根据灰渣浆泵的轴封形式确定，其流量可为同时运行的灰渣浆泵流量的 1%～3%。

（4）当灰渣浆泵直接串联时，应符合：①泵的流量和扬程的选择应根据灰渣浆量和灰渣管道的总阻力确定，各级泵的流量应相同；②串联泵宜装设调速装置，调速装置宜装设在末级泵上；③当泵的串联级数超过 3 级时，可按串联级数设置不同的轴封水泵组。

（5）离心式灰渣浆泵不宜采用并联运行。

（6）泵的有效汽蚀余量大于泵的必需汽蚀余量，并留有不小于 0.3m 的汽蚀安全裕量。

2. 柱塞式灰浆泵

（1）柱塞式灰浆泵（简称柱塞泵）应根据排送的灰浆量和灰浆管的阻力选择，泵流量应为灰浆量和冲洗水量之和的 100%，压力宜为管道阻力的 140%。

（2）在同一泵房内，当柱塞泵运行的台数为 1 台时，设 1 台备用，必要时可另预留 1 台泵基础；运行的台数为 2～3 台时，设 2 台备用。

（3）柱塞泵容量不能满足输送要求时，两台柱塞泵可采用并联运行方式，其设备型号和参数应相同。

（4）柱塞泵进出口管道上应设空气罐或其他缓冲设施，当出口缓冲罐为分体布置时，宜布置在室外。

（5）柱塞泵房内应设有清洁、可靠、连续的供冲洗、密封柱塞用的水源，其水量和水压应由制造厂家提供。

## 三、设计计算

### （一）管道水力计算

1. 管道直径计算

（1）管道内径计算

$$d_j=\sqrt{\frac{4G_{hu}}{3600\pi v}}=0.0188\sqrt{\frac{G_{hu}}{v}} \tag{3-37}$$

式中　$d_j$——管道的计算内径，m；

$v$——管道内浆体的推荐流速，m/s，灰浆管≥1.0m/s，灰渣管≥1.6m/s，渣管≥1.8m/s，液态渣管≥2.2m/s；

$G_{hu}$——进入管道的灰浆、渣浆和灰渣浆流量，m³/h，对于灰渣浆泵

$$G_{hu}=(1.0\sim1.05)G_{hz}+Q_{jf}$$

式中　$G_{hz}$——灰、渣沟中混合物流量，m³/h，按式（3-23）计算；

$Q_{jf}$——轴封水量，m³/h，一般为同时运行的灰渣浆泵流量的 1%～3%；

1.0～1.05——考虑不可预见的水量约占灰渣混合物流量的 5%，当认为 $G_{hz}$ 值计算准确时也可不考虑增加。

（2）核算管道内浆体的实际流速

$$v'=\frac{4G_{hu}}{3600\pi d_n^2} \tag{3-38}$$

式中　$v'$——管道内浆体的实际流速，m/s；

$d_n$——根据计算内径选用标准管道后的灰、渣管内径，m，对于输灰的钢管其壁厚应不小于 7mm，对于灰渣混除的钢管其壁厚应不小于 10mm，对于输渣的管道，建议选择耐磨钢管。

2. 管道阻力计算

（1）清水阻力系数及灰渣密度计算。

1）雷诺数的计算，根据附录 C 计算。

2）清水阻力系数（$\lambda_s$）的计算公式。清水阻力系数（$\lambda_s$）在层流区、层流至紊流过渡区、水力光滑区、水力光滑区至粗糙过渡区和水力粗糙区（即阻力平方区）有不同的计算公式。

应先判别流态的雷诺数（$Re$）确定其流态属于哪个区，然后按该区的公式计算清水阻力系数：

a. 当 $Re<10^5$ 时用水力光滑区公式，按式（3-39）计算

$$\lambda_s=\frac{0.3164}{Re^{1/4}} \tag{3-39}$$

b. 当 $10^5\leqslant Re\leqslant 10^6$ 时用粗糙过渡区公式，按式（3-40）计算

$$\lambda_s=\frac{1.42}{\left[\lg\left(Re\frac{d_n}{\varepsilon}\right)\right]^2} \tag{3-40}$$

粗糙过渡区也可按 DL/T 5142—2012《火力发电厂除灰设计规程》中推荐的灰渣管输送清水阻力系数，即按式（3-41）计算（注意在过渡区的边界处不宜采用，需判断）

$$\lambda_s=0.11\times\left(\frac{\varepsilon}{d_n}+\frac{68}{Re}\right)^{0.25} \tag{3-41}$$

c. 当 $Re\geqslant 10^6$ 时用阻力平方区公式，即

$$\lambda_s=\frac{1}{\left(1.14+2\lg\frac{d_n}{\varepsilon}\right)^2} \tag{3-42}$$

式中　$\varepsilon$——灰渣管绝对粗糙度，mm，见表 3-25；

$d_n$——灰、渣管内径，mm；

$Re$——雷诺数，计算方法见附录 C。

表 3-25　　灰渣管内壁的绝对粗糙度$\varepsilon$

| 管　材 | 绝对粗糙度（mm） | 管　材 | 绝对粗糙度（mm） |
|---|---|---|---|
| 无缝钢管 | 0.1～0.2 | 钢丝网骨架塑料聚乙烯复合管 | 0.01 |
| 焊接钢管 | 0.15～0.3 | 钢橡复合管 | 0.03 |
| 铸铁管 | 0.3～0.5 | 高分子复合管 | 0.01 |
| 衬胶钢管 | 0.046～0.049 | 其他管 | 由制造厂家提供 |

当灰渣管在使用长时间后因腐蚀或轻微结垢使得管壁粗糙度有所增加时，可由表 3-26 查得$\lambda_s$值。

表 3-26　　管壁绝对粗糙度与清水阻力系数的关系（一）

| 管材 | 绝对粗糙度$\varepsilon$（mm） | $\lambda_s$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 管道内径$d_n$（mm） | | | | | | |
| | | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| 无缝钢管 | 0.2 | 0.0196 | 0.0186 | 0.0178 | 0.0172 | 0.0167 | 0.0163 | 0.0159 |
| 焊接钢管 | 0.3 | 0.0217 | 0.0205 | 0.0196 | 0.0189 | 0.0183 | 0.0178 | 0.0174 |
| 铸铁管 | 0.5 | 0.0248 | 0.0234 | 0.022 | 0.0214 | 0.0207 | 0.0201 | 0.0196 |

当灰渣管不结垢，且磨损作用为主时，管壁的绝对粗糙度将日益减小，这时可查表 3-27 中的$\lambda_s$值。在运行初期阻力的富裕量要比磨损后的小些。

表 3-27　　管壁绝对粗糙度与清水阻力系数的关系（二）

| 管材 | 绝对粗糙度$\varepsilon$（mm） | $\lambda_s$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 管道内径$d_n$（mm） | | | | | | |
| | | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| 无缝钢管 | 0.1 | 0.0167 | 0.0159 | 0.0153 | 0.0148 | 0.0144 | 0.0140 | 0.0137 |
| 焊接钢管 | 0.15 | 0.0183 | 0.0174 | 0.0167 | 0.0161 | 0.0157 | 0.0153 | 0.0149 |
| 铸铁管 | 0.3 | 0.0217 | 0.0205 | 0.0196 | 0.0189 | 0.0183 | 0.0178 | 0.0174 |

对铸石管绝对粗糙度可按 0.5mm 考虑，对结垢严重的灰渣浆管，可考虑再留有 10%～20%的富裕量。

3）灰浆的密度。灰浆的密度是指灰渣水混合物中灰浆部分密度，计算公式为

$$\rho_{hu}^{h}=\frac{\rho_{sh}(Q_{cx}^{h}+Q_{cx}^{z}+Q_{jf})+G_{h}}{G_{hu}} \tag{3-43}$$

式中　$\rho_{hu}^{h}$——灰浆的密度，t/ m³；

$G_{hu}$——进入管道的灰浆流量，m³/h，$G_{hu}$值只计算冲灰渣的水体积及灰体积，不计渣所占体积；

$\rho_{sh}$——清水密度，t/m³；

$Q_{cx}^{h}$——排入排灰设备的全部冲灰水量，m³/h；

$Q_{cx}^{z}$——排入排渣设备的全部冲渣水量，m³/h；

$Q_{jf}$——轴封水量，m³/h；

$G_{h}$——排入排灰、渣设备的灰量，t/h。

当单独输灰时，则式（3-43）写成以下形式

$$\rho_{hu}^{h'}=\frac{\rho_{sh}(Q_{cx}^{h}+Q_{jf})+G_{h}}{G_{hs}+Q_{jf}} \tag{3-44}$$

式中　$G_{hs}$——进入灰沟的灰水混合物流量，m³/h。

4）灰渣浆密度。灰渣浆密度是指灰渣水混合物中灰渣浆部分密度，计算公式为

$$\rho_{hu}=\frac{\rho_{sh}(Q_{cx}^{h}+Q_{cx}^{z}+Q_{jf})+G_{h}+G_{z}}{G_{hu}} \tag{3-45}$$

式中　$\rho_{hu}$——灰渣浆密度，t/m³；

$G_{z}$——排入排灰、渣设备的渣量，t/h。

5）渣的附加阻力系数$\lambda_z$。渣的附加阻力系数与渣的质量稠度、管内流速及渣的特性等因素有关。

a. 灰渣浆中渣的质量稠度$\mu_z$

$$\mu_{z}=\frac{G_{z}}{(Q_{cx}^{h}+Q_{cx}^{z}+Q_{jf})\rho_{sh}}\times 100\% \tag{3-46}$$

b. 根据$\mu_z$值和经核算的灰、渣浆实际流速$v'$，由表3-28中查渣的附加阻力系数$\lambda_z$。$\mu_z$值若有修正，则采用修正后的值再查表3-28。

**表3-28　　渣的附加阻力系数$\lambda_z$**

| $v'$ (m/s) | 渣的质量稠度$\mu_z$（%） | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 |
| 1.2 | 1.59 | 2.71 | 3.92 | 4.92 | 6.02 | 7.06 | 8.10 | 9.13 | 10.16 | 11.20 | — | — |
| 1.4 | 0.84 | 1.52 | 2.18 | 2.91 | 3.64 | 4.36 | 5.07 | 5.79 | 6.50 | 7.22 | — | — |
| 1.5 | 0.60 | 1.13 | 1.65 | 2.25 | 2.86 | 3.46 | 4.06 | 4.65 | 5.25 | 5.85 | — | — |
| 1.6 | 0.46 | 0.88 | 1.30 | 1.80 | 2.29 | 2.80 | 3.30 | 3.81 | 4.32 | 4.83 | 7.47 | 10.70 |
| 1.7 | 0.36 | 0.70 | 1.04 | 1.43 | 1.82 | 2.24 | 2.67 | 3.09 | 3.51 | 3.94 | | |
| 1.8 | 0.27 | 0.55 | 0.82 | 1.13 | 1.44 | 1.81 | 2.18 | 2.54 | 2.91 | 3.28 | 5.26 | 7.53 |
| 1.9 | 0.24 | 0.47 | 0.69 | 0.94 | 1.18 | 1.49 | 1.80 | 2.11 | 2.42 | 2.73 | | |
| 2.0 | 0.20 | 0.39 | 0.57 | 0.78 | 0.98 | 1.25 | 1.51 | 1.73 | 2.04 | 2.31 | 3.81 | 5.53 |
| 2.1 | 0.17 | 0.33 | 0.48 | 0.66 | 0.83 | 1.06 | 1.29 | 1.51 | 1.74 | 1.97 | | |
| 2.2 | 0.14 | 0.28 | 0.41 | 0.56 | 0.71 | 0.91 | 1.10 | 1.30 | 1.49 | 1.69 | 2.84 | 4.16 |
| 2.3 | 0.12 | 0.24 | 0.36 | 0.49 | 0.62 | 0.79 | 0.95 | 1.12 | 1.28 | 1.45 | | |
| 2.4 | 0.10 | 0.21 | 0.32 | 0.44 | 0.55 | 0.69 | 0.83 | 0.97 | 1.11 | 1.25 | 2.17 | 3.18 |
| 2.5 | 0.09 | 0.19 | 0.29 | 0.40 | 0.50 | 0.62 | 0.75 | 0.87 | 1.0 | 1.12 | — | — |

注　1. 渣的物理特性系数$K$对固态渣$K$=1，对液态渣$K$=1.25，表中流速$v'$是指$K$=1时的流速，当$K \neq 1$时，流速应被$K$除，然后用被除后的流速去查表或图。

2. 表中阻力系数已放大100倍，使用时要除以100。

3. 如果计算出的稠度或修正后的稠度不是整数值，采用差值法查此表。流速不是表上的值时，同样采用差值法查此表。

c. 渣的附加阻力系数的修正。

渣的附加阻力系数通常有粒度修正、定期排渣修正和长距离输渣时的修正。一般情况都要进行粒度修正。定期排渣修正视采用的排渣方式而定，是定期排渣就要修正，否则不用修正。当输送距离大于250m时即可考虑长距离修正。

（a）粒度修正。鉴于表3-28是对粒径为2～40mm的渣粒试验做出的，当渣中的细颗粒较多时，应将0.25mm以下的渣量扣除后计算其质量稠度，即

$$\mu_z' = \mu_z(1-\phi) \tag{3-47}$$

式中　$\mu_z'$——粒度修正后的质量稠度，%；

$\mu_z$——按式（3-46）算得的质量稠度，%；

$\phi$——渣量中粒径在0.25mm以下所占的比例，当缺少渣的颗粒分析资料时，$\phi$值可取0.3～0.5。

渣的颗粒大小与煤的结渣特性和炉型（燃烧温度）关系较大。通常煤的熔点低和结渣能力强、燃烧温度高的情况，则颗粒大的渣较多，$\phi$值可取小值；反之，颗粒大的渣较少，$\phi$值可取大值。

（b）定期排渣的修正。一般定期排渣时，在两个排渣斗排渣时间$t_1$之间有一个间隙时间$t_2$，用来开闭放渣门和阀门，故进入输渣管内渣的质量稠度是变化的。经过水力喷射器一段时间的输送后，渣管内渣的质量稠度趋向均匀化。对水封排渣斗，可按式（3-48）对质量稠度进行修正

$$\mu_z'' = \mu_z \frac{t_1}{t_1+t_2} \tag{3-48}$$

式中　$\mu_z''$——定期排渣修正后的质量稠度，%；

$\mu_z$——按式（3-46）算得的质量稠度，%。

（c）长距离输渣时的修正。长距离输渣时，由于灰渣管内只有一段有渣，相当于渣的附加阻力系数要打一个折扣，可按下式计算

$$\lambda_z' = \lambda_z \frac{60v'\sum t}{L} \tag{3-49}$$

式中　$\lambda_z'$——长距离输渣修正后的渣的附加阻力系数；

$\lambda_z$——由表3-28查得的渣的附加阻力系数；

$v'$——灰渣管中的实际流速，m/s；

$\sum t$——每次冲洗全部排渣槽所用的时间，包括辅助时间，min；

$L$——灰渣管总长度，m。

（2）管道的摩擦阻力系数。

1）灰管

$$\lambda=\rho_{hu}^{h'}\lambda_s \tag{3-50}$$

式中 $\lambda$——灰管的摩擦阻力系数；

$\rho_{hu}^{h'}$——灰浆密度，t/m³，见式（3-44）；

$\lambda_s$——清水摩擦阻力系数，见式（3-39）～式（3-42）。

2）渣管

$$\lambda=\lambda_s+\lambda_z \tag{3-51}$$

式中 $\lambda$——渣管的摩擦阻力系数；

$\lambda_z$——由表3-28查得的渣的附加阻力系数，若有修正，则要采用修正后的数值。

3）灰渣管

$$\lambda=\rho_{hu}^{h}\lambda_s+\lambda_z \tag{3-52}$$

式中 $\lambda$——灰渣管的摩擦阻力系数；

$\rho_{hu}^{h}$——灰渣水混合物中灰浆部分密度，t/m³，见式（3-43）。

4）局部阻力系数

$$\xi=\sum\xi\frac{d_n}{\lambda_s L} \tag{3-53}$$

式中 $\xi$——局部阻力系数；

$\sum\xi$——各管件、弯头的局部阻力系数之和，可查附录D；

$L$——灰渣管长度，m；

$d_n$——灰渣管内径，m。

在初步设计计算时，局部阻力系数$\xi$可取0.05。由于局部阻力大多集中于灰渣泵房，当管线较长时，特别是在地形变化不大的情况下，局部阻力按管路阻力的5%是偏大的，可根据具体情况在2%～5%范围内选用。

（3）灰渣管阻力

$$H_{hz}=9.81\left[(1+\xi)\frac{\lambda v'^2}{2g}\frac{L}{d_n}+\rho_{hu}\Delta h\right] \tag{3-54}$$

式中 $H_{hz}$——阻力，kPa；

$\xi$——局部阻力系数，初步设计计算时可采用0.02～0.05；

$\lambda$——灰渣管的摩擦阻力系数；

$v'$——灰渣浆的实际流速，m/s；

$g$——重力加速度，取9.81m/s²；

$L$——灰渣管长度，m；

$d_n$——灰渣管内径，m；

$\rho_{hu}$——灰渣浆密度，t/m³，见式（3-45）；

$\Delta h$——灰渣浆池液面高度与灰渣管出口中心线的垂直高差，m。

当管路中出现驼峰（见图3-64）时，管路总长度为$L=L_1+L_2$，其中$AB=L_1$，$BC=L_2$；灰渣泵进口管道中心线与灰渣管出口中心线的垂直高差为$\Delta h$，驼峰顶部管道中心线与出口管中心线标高差为$\Delta h'$，$\Delta h_{max}=\Delta h+\Delta h'$。

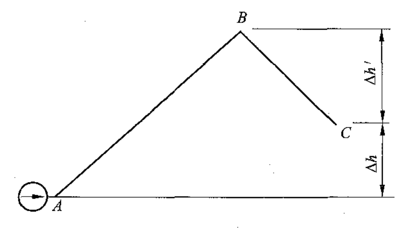



图3-64 管路中的驼峰

1）当$\frac{\rho_{hu}\Delta h'}{L_2}<i$时，这时$BC$段的高差$\Delta h'$不足以克服管路的水力坡降$i$，即$BC$段不能自流

$$i=\lambda\frac{v'^2}{2gd_n} \tag{3-55}$$

此时的阻力计算公式为式（3-54）。

2）当$\frac{\rho_{hu}\Delta h'}{L_2}\geqslant i$时，这时$BC$段的高差$\Delta h'$能克服管路的水力坡降$i$，即$BC$段能自流。此时的阻力计算公式为

$$H_{hz}=9.81\times\left[(1+\xi)\frac{\lambda v'^2}{2g}\times\frac{L_1}{d_n}+\rho_{hu}\Delta h_{max}\right] \tag{3-56}$$

式中符号意义同式（3-54），但$L$变为$L_1$，$\Delta h$变为$\Delta h_{max}$。

除了用式（3-54）计算管道阻力外，还可用威连汉司公式计算管道阻力。

（二）灰渣浆泵的选型计算

1. 灰渣浆泵流量

$$G'_{hu}=K_2G_{hz}+Q_{jf} \tag{3-57}$$

式中 $G'_{hu}$——灰渣浆泵的选泵流量，m³/h；

$K_2$——灰渣浆泵流量富裕系数，一般取1.1；

$G_{hz}$——灰渣沟中混合物流量，m³/h，见式（3-23）；

$Q_{jf}$——轴封水量，m³/h。

2. 灰渣浆泵扬程

$$H'_{hz}=K_3H_{hz} \tag{3-58}$$

式中 $H'_{hz}$——灰渣浆泵的选泵扬程，kPa；

$K_3$——考虑设备及管道磨损或结垢的灰渣浆泵扬程富裕系数，一般取1.1～1.2；

$H_{hz}$——灰渣管的阻力，是按（1～1.05）$G_{hz}+Q_{jf}$计算得到的。

按以上计算出的流量和扬程，查厂家样本选择合适的灰渣浆泵。所选灰渣浆泵的流量和扬程不应小于$G'_{hu}$和$H'_{hz}$。

3. 灰渣浆泵功率的计算

（1）灰渣浆泵的轴功率

$$P_e = \frac{GH\rho}{3600\eta} \tag{3-59}$$

式中 $P_e$——灰渣浆泵的轴功率，kW；

$G$——灰渣浆泵的流量，$m^3/h$；

$H$——灰渣浆泵的扬程，kPa；

$\rho$——输送介质的密度，$t/m^3$；

$\eta$——灰渣浆泵的效率。

（2）灰渣浆泵电动机的额定功率

$$P_M \geqslant K_4 P_e \tag{3-60}$$

式中 $P_M$——灰渣浆泵电动机的额定功率，kW；

$P_e$——灰渣浆泵需要的轴功率，kW；

$K_4$——考虑重载启动和功率的储备系数，一般取1.15～1.2。

4. 其他说明

一般情况下，管道的计算阻力和实际运行是相吻合的。当煤质或负荷波动较大，物料特性变化较大，或输送距离较长、灰渣浆泵串联级数较多时，可能出现灰渣浆泵富裕度较大，此时，可根据现场实际运行工况，采取下列措施来进行灰渣浆泵系统的调节：

（1）如果灰渣浆泵长期在较大的出力裕度工况下运行，对于离心泵，可通过更换叶轮或重新加工叶轮的方法，以调节出力达到节能目的。因为流量与叶轮直径成正比，扬程与叶轮直径平方成正比，功率与叶轮直径三次方成正比。

（2）如果灰渣浆泵出力与灰渣（浆）量基本匹配，当灰渣（浆）量较小时，可以采用变频装置或液力偶合器来调节灰渣泵的出口流量。若灰渣浆泵为串联运行，可只在末级灰渣泵增设变频装置或液力偶合器。

5. 水力输送管道荷载和补偿

管道支架主要承受垂直重力和水平推力，而水平推力主要是由三部分组成：①热膨胀力；②内压力，在弯头和堵管时产生的压力；③由速度产生的摩擦推力。

对于热膨胀，靠合理的设置膨胀节及支架，靠弯头自然补偿和膨胀节补偿尽可能使固定支架上热膨胀力为零。弯头处的内压力主要是水平推力，速度产生的摩擦推力相对小得多。

非直埋的钢管及复合管应进行补偿计算，管道热膨胀引起的伸缩可采用填函式套筒伸缩节、快速管接头或连续弯头（自补偿），并应符合下列规定：

（1）两伸缩节间的最大距离可按下式计算

$$L_{max} = \frac{L_h}{\alpha_1(t_{max} - t_{min})} \tag{3-61}$$

式中 $L_{max}$——两伸缩节间的最大距离，m；

$L_h$——伸缩节的最大伸缩长度，单伸缩节可取0.2m，双伸缩节可取0.4m；

$\alpha_1$——管道的线膨胀系数，铸铁管可取$1.1\times10^{-5}$/℃，钢管可取$1.2\times10^{-5}$/℃；

$t_{max}$——管道中灰渣水混合物的温度，可取60℃；

$t_{min}$——当地最低气温，℃。

（2）快速管道接头的间距可采用10～15m，或根据每个快速接头的最大伸缩长度$L_h$乘以安全系数0.75后代入式（3-61）中计算确定。

（3）当有充分论证时，沿地面敷设的灰渣管可不设补偿器等设施，但应计算管道的温度内力。

补偿器的安装长度和快速接头的安装间隙，应根据管道中灰渣浆温度（或当地最低气温）与安装时的气温差计算确定。设计文件中宜注明不同气温时的安装长度和间隙。

（4）当钢管需要设置法兰接头时，宜每隔20～30m设一接头。对于结垢严重的灰管，法兰接头的间距应为10～15m。

（5）架空管道上的补偿器处的支座，当高度超过3m时，应在支座上设置检修小平台，并应有栏杆和爬梯。

（6）支架推力可按以下规定计算：

1）刚性滑动、滚动支座的轴向推力可按下式计算

$$F = fwl\cos\gamma \tag{3-62}$$

式中 $F$——支座的轴向推力，kN。

$w$——单位长度灰管自重加管内灰水重，kN/m。

$l$——支座间的距离，m。

$\gamma$——灰管轴线与水平面的夹角，（°）。

$f$——管壁与支座的摩擦系数，滑动支座时，钢与钢（或生铁）可取0.3，钢与混凝土可取0.6；滚动支座时，钢与钢（或生铁）可取0.1。

2）固定支座上承受的轴向推力应包括下列各项：

a. 固定支座两侧伸缩节范围内的中间支座与管道间产生的摩擦阻力$F_1$（kN），计算公式如下：

对于直线段的固定支座

$$F_1 = fw(l_1 - 0.8l_2)\cos\gamma \tag{3-63}$$

式中 $l_1$——固定支座至伸缩节距离较大的一侧的管道长度，m；

$l_2$——固定支座至伸缩节距离较小的一侧的管道长度，m；

0.8——考虑两侧管段上温度及摩擦力的不均匀性的系数。

对于转角处的固定支座

$$F_1 = fwl\cos\gamma \tag{3-64}$$

式中 $l$——固定支座至伸缩节间的距离，m。

b. 填函式伸缩节产生的摩擦阻力 $F_2$（kN），计算公式如下：

对于转角固定支座或仅一侧装有伸缩节的直线段固定支座

$$F_2 = \pi Dbfp_0 \tag{3-65}$$

式中 $D$——灰管外径，m；

$b$——伸缩节填料长度，m；

$f$——填料与管壁的摩擦系数，可取 0.3；

$p_0$——相应管道内的工作压力，kPa。

对于两侧装有伸缩节的直线段固定支座

$$F_2 = 0.2\pi Dbfp_0 \tag{3-66}$$

注：在任何情况下，式（3-65）与式（3-66）中 $bfp_0$ 不应小于 7.5kN/m。

c. 管道内压力产生的轴向推力 $F_3$（kN），仅在转角固定支座或附近有阀门的固定支座上产生，计算公式如下

$$F_3 = \frac{1}{4}\pi d^2 p_0 \tag{3-67}$$

式中 $d$——灰管内径，m；

$p_0$——相应管道内的工作压力或试验压力，kPa。

d. 液体摩擦管壁产生的阻力 $F_4$（kN），计算公式如下

$$F_4 = \frac{1}{4}\pi d^2 i_0 L\rho \tag{3-68}$$

式中 $i_0$——单位长度的水头损失；

$\rho$——灰水混合物的重力密度，kN/m³；

$L$——灰管长度，对于直线段的固定支座可取相邻两伸缩节的间距，对于转角处的固定支座可取固定支座至伸缩节的间距，m。

e. 管道敷设坡度超过 0.5%时，管道自重加管道灰水质量产生的轴向推力 $F_5$(kN)，计算公式如下

$$F_5 = wL\sin\gamma \tag{3-69}$$

当采用快速管道接头时，上述公式中 $l_1$、$l$ 可取 3 节管长，$l_2$ 可取 1 节管长；$L$ 值可取固定支座前后各 3 节管长，实际节数少于 3 节时，计算中应采用实际值；$b$ 值可取密封胶圈与一端管端节接触承受水压的宽度，密封胶圈与管壁的摩擦系数 $f$ 可取 0.8。

（7）敷设 3 条及以上管道时，支座上因温度变化引起的轴向推力，应乘以牵制系数 $K$：3 条管道，$K$=0.67；4 条管道及以上，$K$=0.50。

（8）作用在固定支墩（架）上的灰渣管的总推力，应根据下列工况计算确定：

1）正常运行时

$$\sum F = n[K(F_1 + F_2) + F_{3G} + F_4 + F_5] + \sum F' \tag{3-70}$$

2）备用管开始投入时

$$\sum F = (n+1)[K(F_1 + F_2) + F_{3G} + F_4 + F_5] \tag{3-71}$$

3）最后安装的管道试压时

$$\sum F = n[K(F_1 + F_2) + F_{3G} + F_4 + F_5] + F_{3S} + \sum F' \tag{3-72}$$

$$\sum F' = F_1 + F_2 + F_5 \tag{3-73}$$

式中 $\sum F$——作用在固定支墩（架）上的灰渣管总轴向推力，kN；

$n$——支墩（架）上最终正常运行灰渣管总条数；

$F_{3G}$——相应管段的工作压力产生的轴向推力，kN；

$F_{3S}$——相应管段的试验压力产生的轴向推力，kN；

$\sum F'$——1 条备用灰渣管在空管时的总轴向推力，kN。

需要注意的是：当备用灰渣管多于 1 条时，上述公式应作相应修改；第三工况中“最后安装的管道”指的是备用灰渣管；工作压力和试验压力应分别考虑计算；直线段的推力 $\sum F$ 即为合成推力，转角处的推力 $\sum F$ 仅为一个方向的分推力。

## 四、设备选型

1. 离心式灰渣浆泵

离心式灰渣浆泵，是利用叶轮的离心力作用，使灰渣水混合物（即灰渣浆）流动，并产生灰渣浆压力，将进入泵壳内的灰渣浆通过管道输送到高（或远）处。火力发电厂常用的灰渣浆泵有 ZGB（P）型灰渣浆泵等。泵型号后加（P）的为串联泵。

ZGB（P）型灰渣浆泵具有结构合理、效率高、运行可靠和维修方便等特点，在允许的工作压力范围内可以多级串联使用，其允许最大工作压力为 3.6MPa。

（1）结构特点。ZGB（P）型灰渣浆泵为卧式、单级、单吸、悬臂双泵壳离心式灰渣浆泵。从传动端方向看，泵为顺时针方向旋转。

ZGB（P）型灰渣浆泵的轴封形式有副叶轮加填料组合式密封和填料密封两种，其结构见图 3-65 和图 3-66。

ZGB（P）型灰渣浆泵的传动部分采用水平中开式稀油润滑托架，并设有内外两组水冷却系统。

ZGB 与 ZGB（P）型灰渣浆泵的过流部件可以互换，外形安装尺寸完全相同，只有轴承形式不同。

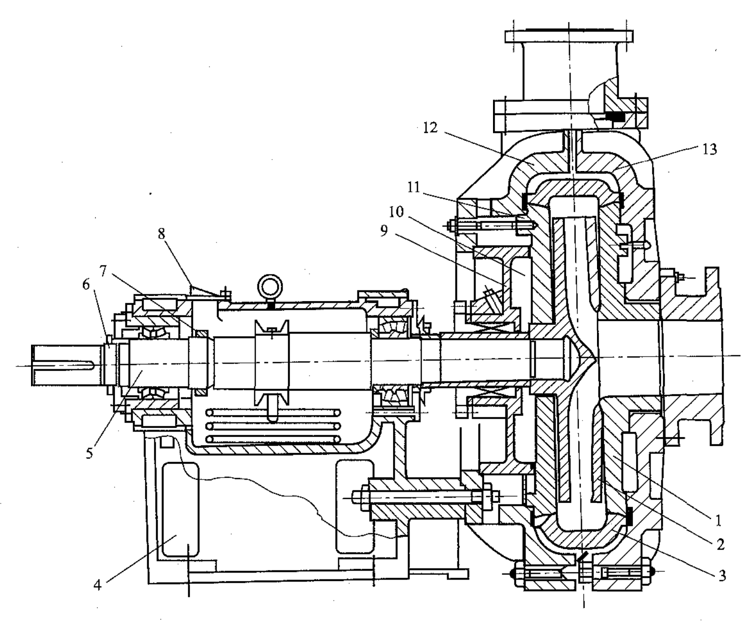



图 3-65 ZGB（P）型灰渣浆泵结构图（一）

1—前护板；2—叶轮；3—护套；4—托架体；5—轴；6—螺母乙；7—调整螺母甲；8—调整孔盖；9—减压盖；10—副叶轮；11—后护板；12—泵体；13—泵盖

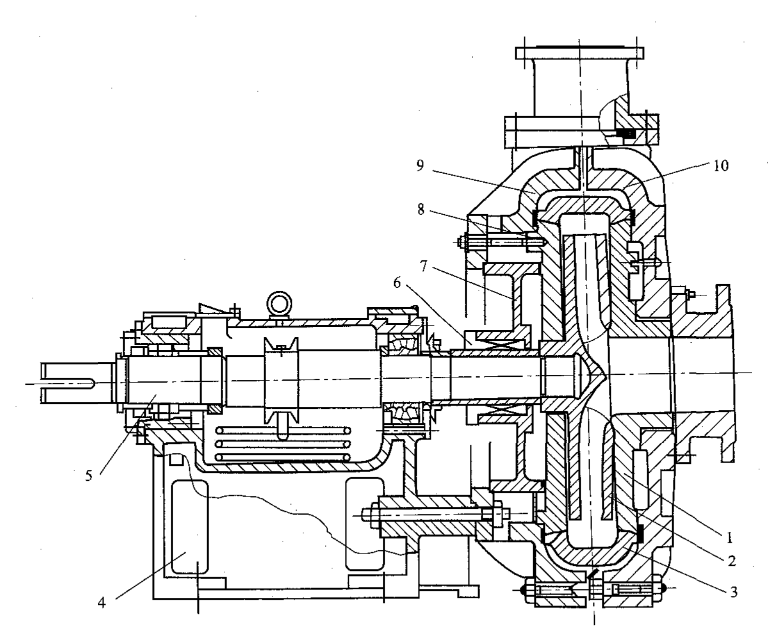



图 3-66 ZGB（P）型灰渣浆泵结构图（二）

1—前护板；2—叶轮；3—护套；4—托架体；5—轴；6—机械密封；7—密封箱；8—后护板；9—泵体；10—泵盖

（2）技术参数。ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线见图 3-67～图 3-80。ZGB（P）型灰渣浆泵的主要技术参数表见表 3-29。ZGB（P）型灰渣浆泵的安装尺寸见图 3-81。

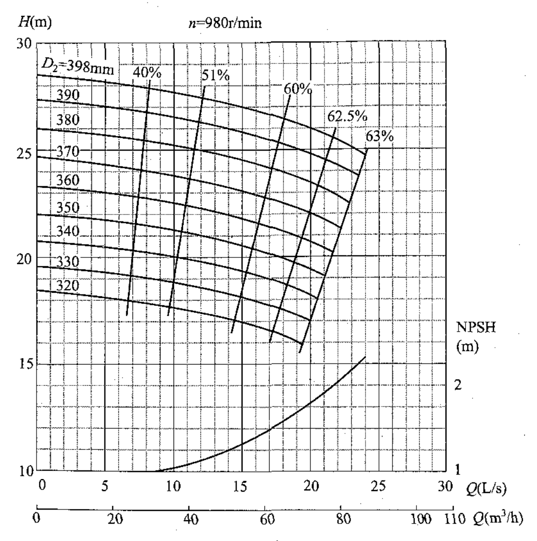



图 3-67 65ZGB 型灰渣浆泵选型曲线（一）

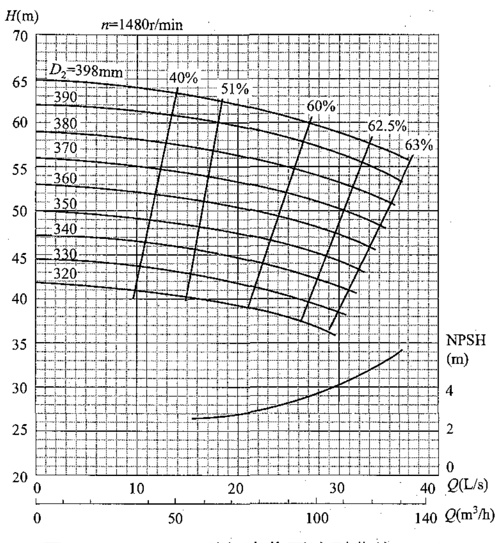



图 3-68 65ZGB 型灰渣浆泵选型曲线（二）

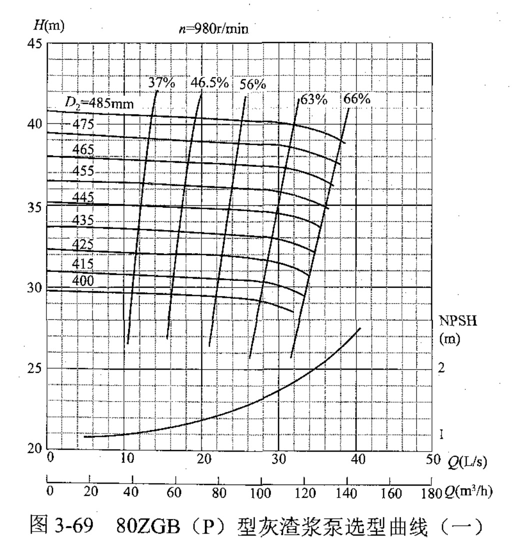



图 3-69 80ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（一）

图 3-70 80ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（二）

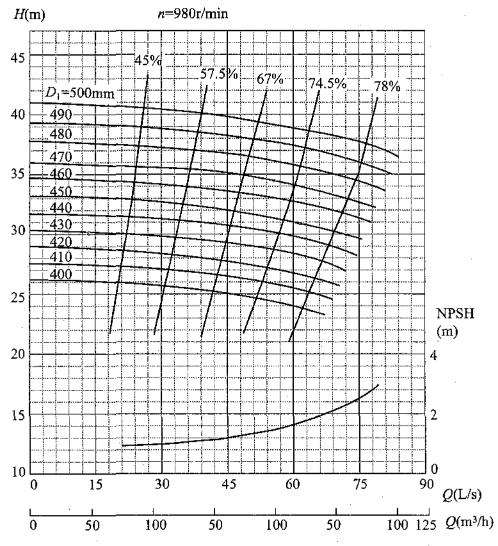



图 3-71 100ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（一）

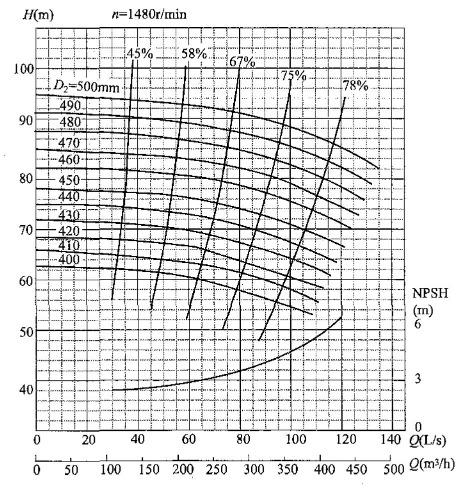



图 3-72 100ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（二）

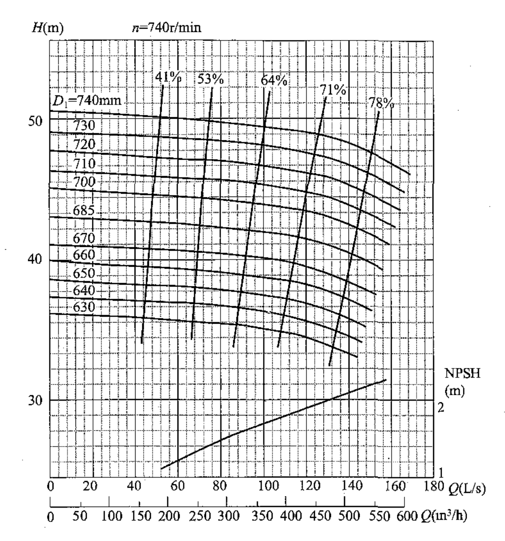



图 3-73　150ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（一）

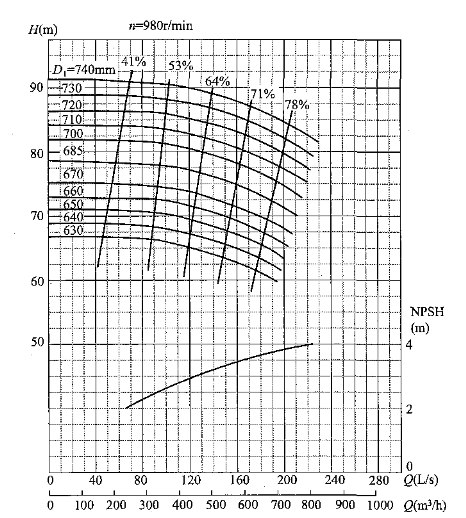



图 3-74　150ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（二）

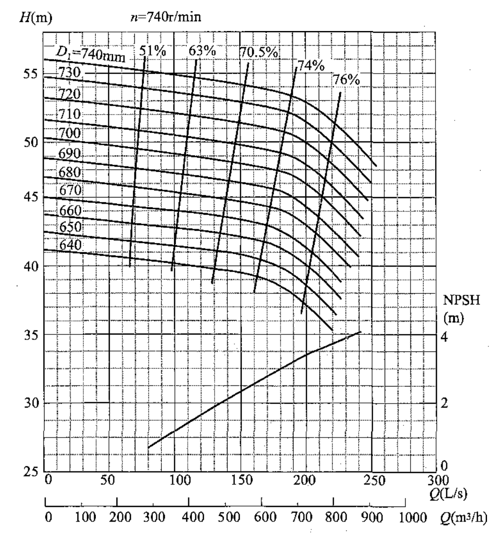



图 3-75　200ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（一）

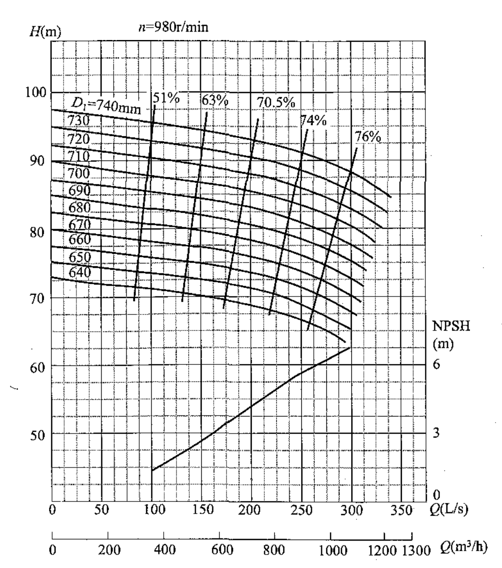



图 3-76　200ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（二）

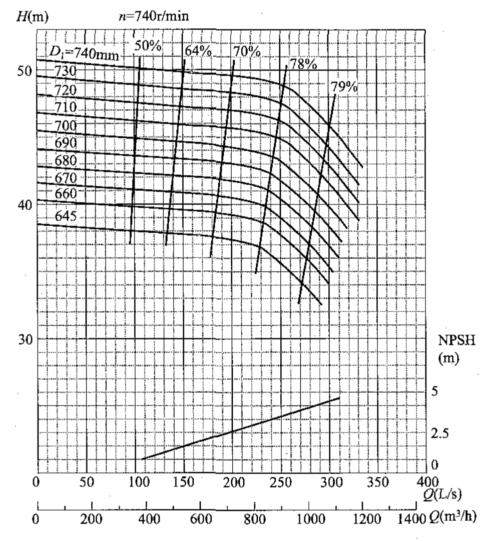



图 3-77　250ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（一）

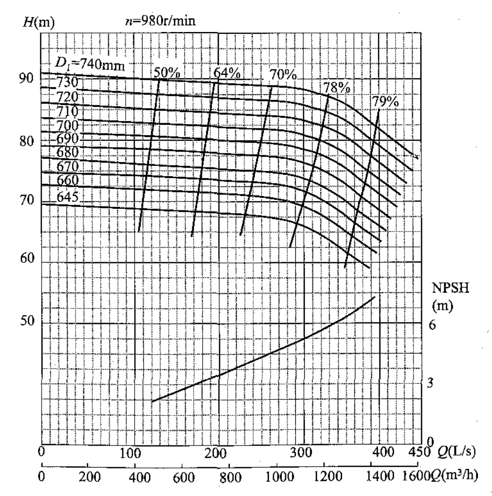



图 3-78　250ZGB（P）型灰渣浆泵选型曲线（二）

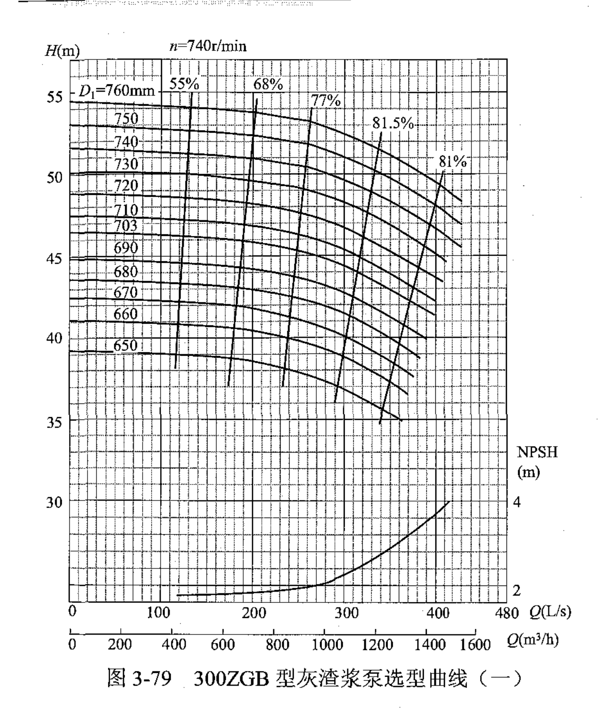



图 3-79　300ZGB 型灰渣浆泵选型曲线（一）

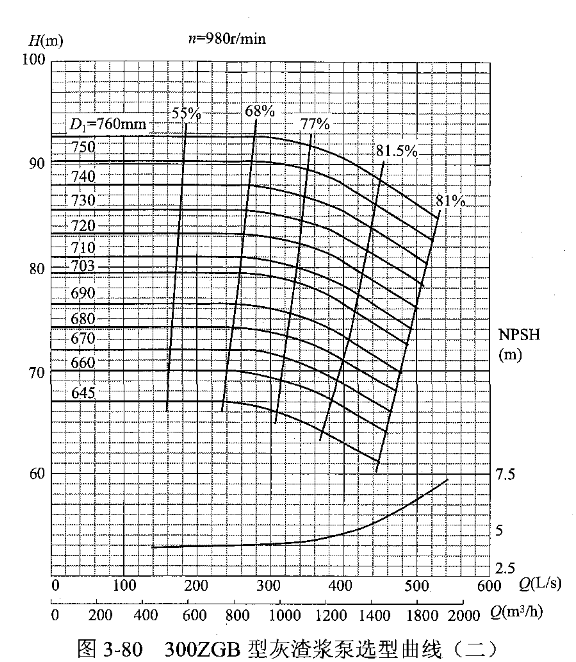



图 3-80　300ZGB 型灰渣浆泵选型曲线（二）

**表 3-29**　　灰渣浆泵主要技术参数

| 泵型号 | 清水性能 | | | | | 轴功率 $P_e$（kW） | 配套电动机型号 功率/电压 | 叶轮直径（mm） | 泵质量（kg） | 排出口直径/吸入口直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$（L/s） | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 汽蚀余量 NPSH（m） | | | | | |
| 65ZGB | 1480 | 31.7 | 58 | 62.5 | 4.5 | 28.8 | Y250M-4，55kW/380V | 390 | 1850 | 65/80 |
| | | 26.4 | 60 | 59.8 | 3.7 | 25.9 | Y225M-4，45kW/380V | | | |
| | | 15.8 | 61 | 47.4 | 3.0 | 19.9 | Y200L-4，30kW/380V | | | |
| | 980 | 21.0 | 25.4 | 62.5 | 2.0 | 8.37 | Y180L-6，15kW/380V | | | |
| | | 17.5 | 26.3 | 59.8 | 1.8 | 7.5 | Y180L-6，15kW/380V | | | |
| | | 10.5 | 26.7 | 47.4 | 1.3 | 5.8 | Y160L-6，11kW/380V | | | |
| 80ZGB（P） | 1480 | 56.7 | 87.5 | 66.1 | 5.2 | 73.7 | Y315M1-4，132kW/380V | 485 | 2500 | 80/100 |
| | | 47.2 | 90.0 | 63 | 4.1 | 66.1 | Y315S-4，110kW/380V | | | |
| | | 28.3 | 91.6 | 48.7 | 2.7 | 52.2 | Y280M-4，90kW/380V | | | |
| | 980 | 37.5 | 38.4 | 66.1 | 2.3 | 21.4 | Y250M-6，37kW/380V | | | |
| | | 31.3 | 39.5 | 63 | 1.8 | 19.2 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | | 18.8 | 40.2 | 48.7 | 1.2 | 15.2 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | 1480 | 52.0 | 73.7 | 66.1 | 4.4 | 56.8 | Y280M-4，90kW/380V | 445 | | |
| | | 43.3 | 75.8 | 63 | 3.5 | 51.1 | Y280S-4，75kW/380V | | | |
| | | 26.0 | 77.1 | 48.7 | 2.3 | 40.4 | Y280S-4，75kW/380V | | | |
| | 980 | 34.4 | 32.3 | 66.1 | 1.9 | 16.5 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | | 28.7 | 33.2 | 63 | 1.5 | 14.8 | Y200L2-6，22kW/380V | | | |
| | | 17.2 | 33.8 | 48.7 | 1.0 | 11.7 | Y200L1-6，18.5kW/380V | | | |

续表

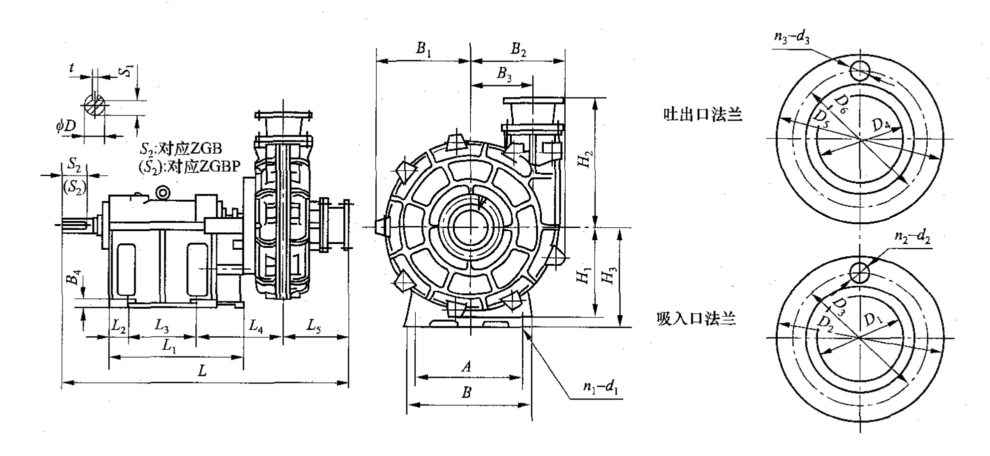
| 泵型号 | 清水性能 转速 $n$ (r/min) | 流量 $Q$ (L/s) | 扬程 $H$ (m) | 效率 $\eta$ (%) | 汽蚀余量 NPSH (m) | 轴功率 $P_e$ (kW) | 配套电动机型号 功率/电压 | 叶轮直径 (mm) | 泵质量 (kg) | 排出口直径/吸入口直径 (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80ZGB (P) | 1480 | 46.8 | 59.5 | 66.1 | 3.5 | 41.3 | Y280S-4，75kW/380V | 400 | 2500 | 80/100 |
| | | 38.9 | 61.2 | 63 | 2.8 | 37.0 | Y250M-4，55kW/380V | | | |
| | | 23.3 | 62.3 | 48.7 | 1.8 | 29.2 | Y250M-4，55kW/380V | | | |
| | 980 | 31.0 | 26.1 | 66.1 | 1.5 | 12.0 | Y200L1-6，18.5kW/380V | | | |
| | | 25.8 | 26.8 | 63 | 1.2 | 10.8 | Y200L1-6，18.5kW/380V | | | |
| | | 15.4 | 27.3 | 48.7 | 0.8 | 8.4 | Y180L-6，15kW/380V | | | |
| 100ZGB (P) | 1480 | 116.7 | 85.1 | 77.9 | 6.0 | 124.9 | Y315L2-4，200kW/380V | 500 | 3000 | 100/152 |
| | | 97.2 | 88.2 | 74.4 | 3.8 | 113.0 | Y315L-4，185kW/380V | | | |
| | | 58.3 | 91.8 | 57.4 | 2.6 | 91.4 | Y315M2-4，160kW/380V | | | |
| | 980 | 77.3 | 37.3 | 77.9 | 2.7 | 36.3 | Y280M-6，55kW/380V | | | |
| | | 64.4 | 38.7 | 74.4 | 1.7 | 32.8 | Y280M-6，55kW/380V | | | |
| | | 38.6 | 40.3 | 57.4 | 1.2 | 26.6 | Y280S-6，45kW/380V | | | |
| | 1480 | 105 | 68.9 | 77.9 | 4.9 | 91.0 | Y315M2-4，160kW/380V | 450 | | |
| | | 87.5 | 71.4 | 74.4 | 3.1 | 82.3 | Y315M1-4，132kW/380V | | | |
| | | 52.5 | 74.4 | 57.4 | 2.1 | 66.7 | Y315S-4，110kW/380V | | | |
| | 980 | 69.5 | 30.2 | 77.9 | 2.1 | 26.4 | Y280S-6，45kW/380V | | | |
| | | 57.9 | 31.3 | 74.4 | 1.7 | 23.9 | Y250M-6，37kW/380V | | | |
| | | 34.8 | 32.6 | 57.4 | 1.1 | 19.4 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | 1480 | 93.4 | 54.5 | 77.9 | 3.8 | 64.0 | Y315S-4，110kW/380V | 400 | | |
| | | 77.8 | 56.4 | 74.4 | 2.4 | 57.8 | Y280M-4，90kW/380V | | | |
| | | 46.7 | 58.8 | 57.4 | 1.7 | 46.9 | Y280S-4，75kW/380V | | | |
| | 980 | 61.8 | 23.9 | 77.9 | 1.7 | 18.6 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | | 51.5 | 24.7 | 74.4 | 1.1 | 16.8 | Y225M-6，30kW/380V | | | |
| | | 30.9 | 25.8 | 57.4 | 0.8 | 13.6 | Y200L2-6，22kW/380V | | | |
| 150ZGB (P) | 980 | 200 | 85.2 | 77.7 | 3.8 | 215.0 | Y400-6，355kW/6kV | 740 | 3450 | 150/200 |
| | | 167.0 | 87.5 | 70.0 | 3.5 | 204.7 | Y400-6，315kW/6kV | | | |
| | | 100.0 | 90.0 | 53.3 | 2.7 | 165.5 | Y400-6，280kW/6kV | | | |
| | 740 | 151.2 | 48.6 | 77.7 | 2.2 | 92.7 | Y355M2-8，160kW/380V | | | |
| | | 126.0 | 49.9 | 70.0 | 2.0 | 88.1 | Y355M2-8，160kW/380V | | | |
| | | 75.6 | 51.3 | 53.3 | 1.5 | 71.3 | Y355M1-8，132kW/380V | | | |
| | 980 | 182.4 | 73.0 | 77.7 | 3.3 | 168.0 | Y400-6，280kW/6V | 685 | | |
| | | 152.0 | 75.0 | 70.0 | 3.0 | 159.7 | Y355L2-6，250kW/380V | | | |
| | | 91.2 | 77.1 | 53.3 | 2.3 | 129.3 | Y355L1-6，220kW/380V | | | |

续表

| 泵型号 | 清水性能 | | | | | 轴功率 $P_e$（kW） | 配套电动机型号 功率/电压 | 叶轮直径（mm） | 泵质量（kg） | 排出口直径/吸入口直径（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 转速 $n$（r/min） | 流量 $Q$（L/s） | 扬程 $H$（m） | 效率 $\eta$（%） | 汽蚀余量 NPSH（m） | | | | | |
| 150ZGB（P） | 740 | 140.0 | 41.6 | 77.7 | 1.9 | 74.2 | Y355M1-8，132kW/380V | 685 | 3450 | 150/200 |
| | | 117.0 | 42.8 | 70.0 | 1.7 | 70.1 | Y315M3-8，110kW/380V | | | |
| | | 70.2 | 44.0 | 53.3 | 1.3 | 56.8 | Y315M2-8，90kW/380V | | | |
| | 980 | 169.2 | 61.8 | 77.7 | 2.8 | 131.9 | Y355L1-6，220kW/380V | 630 | | |
| | | 141.0 | 63.4 | 70.0 | 1.5 | 125.2 | Y355M3-6，200kW/380V | | | |
| | | 84.6 | 65.2 | 53.3 | 1.1 | 101.5 | Y355M1-6，160kW/380V | | | |
| | 740 | 129.6 | 35.2 | 77.7 | 1.6 | 57.6 | Y315M2-8，90kW/380V | | | |
| | | 108.0 | 36.1 | 70.0 | 0.9 | 54.6 | Y315M2-8，90kW/380V | | | |
| | | 64.8 | 37.2 | 53.3 | 0.6 | 44.3 | Y315M1-8，75kW/380V | | | |
| 200ZGB（P） | 980 | 300.0 | 89.0 | 76.3 | 6.7 | 342.9 | Y450-6，560kW/6kV | 740 | 4000 | 200/250 |
| | | 250.0 | 93.4 | 73.7 | 5.6 | 310.5 | Y450-6，560kW/6kV | | | |
| | | 150.0 | 94.2 | 63.2 | 2.7 | 219.1 | Y400-6，355kW/6kV | | | |
| | 740 | 226.5 | 50.7 | 76.3 | 3.8 | 147.5 | Y400-8，220kW/6kV | | | |
| | | 188.5 | 53.3 | 73.7 | 3.2 | 134.3 | Y355L2-8，200kW/380V | | | |
| | | 113.3 | 53.7 | 63.2 | 1.5 | 94.3 | Y355M2-8，160kW/380V | | | |
| | 980 | 283.8 | 79.6 | 76.3 | 6.0 | 290.2 | Y450-6，450kW/6kV | 700 | | |
| | | 236.5 | 83.4 | 73.7 | 5.0 | 262.3 | Y400-6，400kW/6kV | | | |
| | | 141.9 | 84.3 | 63.2 | 2.4 | 185.8 | Y400-6，280kW/6kV | | | |
| | 740 | 214.3 | 45.4 | 76.3 | 3.4 | 125.0 | Y355L2-8，200kW/380V | | | |
| | | 178.6 | 47.6 | 73.7 | 2.9 | 113.0 | Y355L1-8，185kW/380V | | | |
| | | 107.1 | 48.1 | 63.2 | 1.4 | 80.0 | Y315M1-8，132kW/380V | | | |
| | 980 | 259.5 | 66.6 | 76.3 | 5.0 | 222.0 | Y400-6，355kW/6kV | 640 | | |
| | | 216.2 | 69.9 | 73.7 | 4.2 | 210.0 | Y400-6，315kW/6kV | | | |
| | | 129.7 | 70.5 | 63.2 | 2.0 | 141.8 | Y355L1-6，220kW/380V | | | |
| | 740 | 195.9 | 38.0 | 76.3 | 2.9 | 95.6 | Y355M2-8，160kW/380V | | | |
| | | 134.9 | 39.9 | 73.7 | 2.4 | 71.6 | Y315M3-8，110kW/380V | | | |
| | | 97.9 | 40.2 | 63.2 | 1.1 | 61.0 | Y315M3-8，110kW/380V | | | |
| 250ZGB（P） | 980 | 400.0 | 84.0 | 78.2 | 7.3 | 421.2 | Y450-6，630kW/6kV | 740 | 4500 | 250/300 |
| | | 333.3 | 88.0 | 77.0 | 5.7 | 373.4 | Y450-6，560kW/6kV | | | |
| | | 200.0 | 90.1 | 64.1 | 3.3 | 275.6 | Y450-6，450kW/6kV | | | |
| | 740 | 302.0 | 47.9 | 78.2 | 4.2 | 181.4 | Y400-8，280kW/6kV | | | |
| | | 251.7 | 50.2 | 77.0 | 3.3 | 160.9 | Y400-8，250kW/6kV | | | |
| | | 151.0 | 51.4 | 64.1 | 1.9 | 118.7 | Y355L1-8，185kW/380V | | | |

续表

| 泵型号 | 清水性能 | | | | | 轴功率 $P_e$ (kW) | 配套电动机型号 功率/电压 | 叶轮直径 (mm) | 泵质量 (kg) | 排出口直径/吸入口直径 (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 转速 $n$ (r/min) | 流量 $Q$ (L/s) | 扬程 $H$ (m) | 效率 $\eta$ (%) | 汽蚀余量 NPSH (m) | | | | | |
| 250ZGB (P) | 980 | 378.4 | 75.2 | 78.2 | 7.1 | 356.7 | Y450-6，560kW/6kV | 700 | 4500 | $\frac{250}{300}$ |
| | | 315.3 | 78.7 | 77.0 | 5.1 | 315.9 | Y450-6，500kW/6kV | | | |
| | | 189.2 | 80.6 | 64.1 | 3.0 | 233.2 | Y400-6，355kW/6kV | | | |
| | 740 | 285.7 | 42.9 | 78.2 | 4.0 | 153.7 | Y400-8，250kW/6kV | | | |
| | | 238.1 | 44.9 | 77.0 | 2.9 | 136.1 | Y400-8，220kW/6kV | | | |
| | | 142.9 | 46.0 | 64.1 | 1.7 | 100.5 | Y355M2-8，160kW/380V | | | |
| | 980 | 348.6 | 63.8 | 78.2 | 5.5 | 278.8 | Y450-6，450kW/6kV | 645 | | |
| | | 290.5 | 66.9 | 77.0 | 4.3 | 247.4 | Y400-6，400kW/6kV | | | |
| | | 131.6 | 68.5 | 64.1 | 2.5 | 137.9 | Y355L1-6，220kW/380V | | | |
| | 740 | 263.2 | 36.4 | 78.2 | 3.1 | 120.1 | Y355L1-8，185kW/380V | | | |
| | | 219.4 | 38.1 | 77.0 | 2.5 | 106.4 | Y355L1-8，185kW/380V | | | |
| | | 99.4 | 39.1 | 64.1 | 1.4 | 59.4 | Y315M3-8，110kW/380V | | | |
| 300ZGB | 980 | 533.3 | 84.3 | 81.2 | 6.9 | 542.8 | Y500-6，710kW/6kV | 760 | 5500 | $\frac{300}{350}$ |
| | | 444.4 | 89.8 | 80.0 | 5.0 | 489.1 | Y500-6，710kW/6kV | | | |
| | | 266.7 | 93.4 | 68.3 | 3.5 | 357.6 | Y450-6，560kW/6kV | | | |
| | 740 | 402.7 | 48.1 | 81.2 | 3.9 | 233.9 | Y450-8，400kW/6kV | | | |
| | | 335.6 | 51.2 | 80.0 | 2.9 | 210.6 | Y450-8，315kW/6kV | | | |
| | | 201.3 | 53.3 | 68.3 | 2.0 | 154.0 | Y400-8，250kW/6kV | | | |
| | 980 | 493.3 | 72.1 | 81.2 | 5.9 | 429.4 | Y450-6，630kW/6kV | 703 | | |
| | | 411.1 | 76.8 | 80.0 | 4.3 | 386.9 | Y450-6，630kW/6kV | | | |
| | | 246.7 | 79.9 | 68.3 | 3.0 | 282.9 | Y450-6，450kW/6kV | | | |
| | 740 | 372.5 | 41.1 | 81.2 | 3.4 | 184.8 | Y450-8，315kW/6kV | | | |
| | | 310.4 | 43.8 | 80.0 | 2.5 | 166.6 | Y400-8，280kW/6kV | | | |
| | | 177.9 | 45.6 | 68.3 | 1.7 | 116.4 | Y355L1-8，185kW/380V | | | |
| | 980 | 453.3 | 60.9 | 81.2 | 5.0 | 333.3 | Y450-6，560kW/6kV | 646 | | |
| | | 377.8 | 64.9 | 80.0 | 3.6 | 300.5 | Y450-6，500kW/6kV | | | |
| | | 226.7 | 67.5 | 68.3 | 2.5 | 219.7 | Y400-6，355kW/6kV | | | |
| | 740 | 342.3 | 34.7 | 81.2 | 2.9 | 143.4 | Y400-8，250kW/6kV | | | |
| | | 285.3 | 37.0 | 80.0 | 2.1 | 129.4 | Y355L2-8，200kW/6kV | | | |
| | | 171.2 | 38.5 | 68.3 | 1.4 | 94.6 | Y355M2-8，160kW/6kV | | | |




| 型号 \ 尺寸 | $A$ | $B$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ | $D$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $D_6$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $L$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ | $n_1$-$d_1$ | $n_2$-$d_2$ | $n_3$-$d_3$ | $S_1$ | $S_2$ | ($S_2$) | $t$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 65ZGB | 432 | 492 | 352.5 | 377 | 220 | 45 | 65 | 80 | 210 | 168.5 | 65 | 190 | 149 | 360.5 | 475 | 415 | 1379.5 | 580 | 45 | 340 | 400.5 | 330 | 4-22 | 8-22 | 8-22 | 58 | 150 |  | 18 |
| 80ZGB（P） | 560 | 636 | 360 | 445 | 279 | 50 | 80 | 100 | 255 | 200 | 80 | 210 | 168.5 | 383 | 566 | 520 | 1598 | 725 | 72 | 440 | 451 | 296 | 4-29 | 8-22 | 8-22 | 71 | 203 | 180 | 22 |
| 100ZGB（P） | 560 | 636 | 395 | 467 | 290 | 50 | 80 | 152 | 320 | 270 | 100 | 275 | 216 | 394 | 597 | 520 | 1718 | 725 | 72 | 440 | 467 | 402 | 4-29 | 12-22 | 8-26 | 71 | 203 | 180 | 22 |
| 150ZGB（P） | 760 | 840 | 619 | 684 | 453 | 60 | 120 | 200 | 380 | 330 | 150 | 320 | 270 | 655 | 820 | 650 | 2006 | 1013 | 118 | 560 | 615 | 388 | 4-35 | 12-26 | 12-22 | 109 | 200 | 180 | 32 |
| 200ZGB（P） | 760 | 840 | 675 | 735 | 460 | 60 | 120 | 250 | 425 | 370 | 200 | 380 | 330 | 695 | 880 | 650 | 2213 | 1013 | 118 | 560 | 628 | 579 | 4-35 | 12-26 | 12-26 | 109 | 200 | 180 | 32 |
| 250ZGB（P） | 780 | 950 | 645 | 710 | 460 | 60 | 120 | 300 | 515 | 450 | 250 | 445 | 387.5 | 680.3 | 974 | 650 | 2160 | 978 | 128 | 550 | 628 | 500 | 4-40 | 16-33 | 16-30 | 109 | 200 | 180 | 32 |
| 300ZGB | 780 | 950 | 649 | 766 | 475 | 60 | 120 | 350 | 585 | 514.5 | 300 | 520 | 451 | 676 | 883 | 650 | 2282 | 978 | 128 | 550 | 668 | 610 | 4-40 | 20-33 | 16-33 | 109 | 200 |  | 32 |

图3-81 常见ZGB（P）型灰渣浆泵安装尺寸图

2. 柱塞式灰浆泵

柱塞式灰浆泵（简称柱塞泵）是容积式泵的一种，它依靠柱塞在缸体中做往复运动，使密封工作容腔的容积发生变化，来实现吸入液体和压出液体。

柱塞式灰浆泵从缸的数目来看有三缸、四缸、五缸及六缸柱塞泵，其中三缸单作用柱塞泵使用最为广泛；从缸的布置来看，分立式和卧式两种。卧式泵的柱塞及进口管道均可布置在较低的位置，可减少泵进口扬程损失，特别对于有灰浆浓缩装置的系统，进口压头受到限制的情况下，更便于泵的布置，同时对运行检修起吊重件均较方便。立式泵的优点是缸体、柱塞的磨损较均匀。

泵的流体通道是直接与料浆接触，柱塞与料浆的接触面主要是柱塞头，因此磨损面要比一般的活塞泵小。由专用高压柱塞式轴封冲洗水泵供给轴封水，保证料浆颗粒不进入填料、柱塞区，以延长柱塞和填料的使用寿命。为了减少柱塞泵流量和压力的波动，在泵的进出口处均装有压力、流量缓冲罐。

（1）结构特点。PZNB 型喷水式柱塞泥浆泵是柱塞式灰浆泵中较为常见的一种。该泵主要由阀箱、水润滑系统、传动系统、泵底座、喷水装置系统、电动机等部分组成。PZNB 型喷水式柱塞泥浆泵结构见图 3-82。

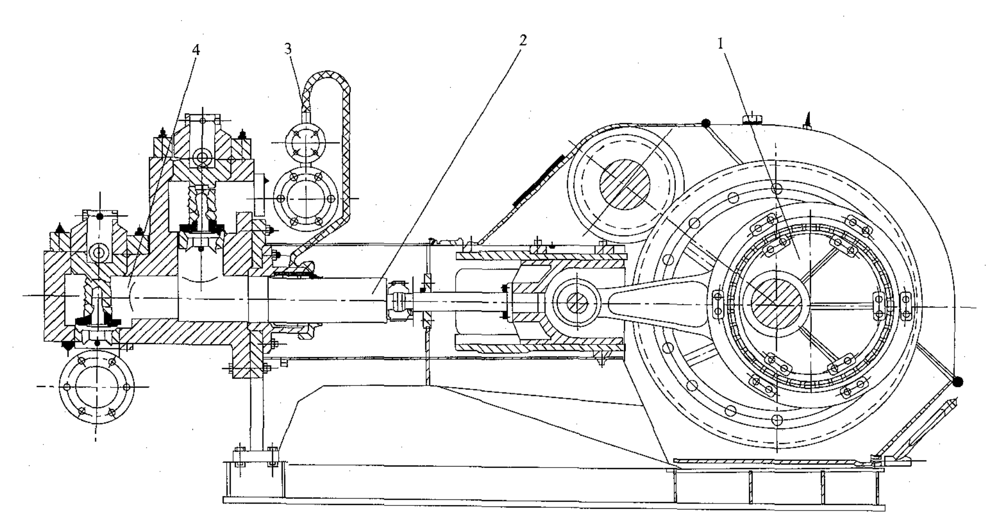



图 3-82 PZNB 型喷水式柱塞泥浆泵结构图

1—传动端；2—柱塞组合；3—喷水装置系统；4—阀箱组件

1）泵的进出口阀箱为整体式阀箱，内装吸入阀和排出阀组，三组阀箱各自独立，并用螺栓连接在机架上。

2）水润滑系统主要包括调节阀、软胶管。压力水通过调节阀不断向填料箱内的柱塞密封构件注水润滑，并清洗和排出密封内的灰浆和磨损物。

3）传动系统主要由齿轮轴、曲轴、连杆、十字头和机架等组成。曲轴系统为偏心结构的组合式轴，传动系统通过皮带传动和齿轮传动两级减速以后，将电动机的回转运动变为柱塞的往复运动。

4）喷水装置系统主要包括配套清洗泵单向阀组和喷水环。柱塞在返回行程（吸程）时，通过喷水环向柱塞周围喷射清水，从而在柱塞圆周方向上形成一个均匀的高压水环，这样可以使柱塞表面黏附的固体颗粒能及时清洗干净，同时又可将柱塞与浆体隔离开，避免固体颗粒进入密封系统，造成严重的表面磨损，以延长柱塞和密封的寿命。

（2）技术参数。PZNB 型喷水式柱塞泥浆泵的主要技术参数见表 3-30。

**表 3-30　PZNB 型喷水式柱塞泥浆泵主要技术参数表**

| 型　　号 | PZNB-100/2.5 | PZNB-115/2.5 | PZNB-130/2.5 | PZNB-145/2.5 | PZNB-160/2.5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 流量（$m^3/h$） | 100 | 115 | 130 | 145 | 160 |
| 压力（MPa） | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| 柱塞直径（mm） | 170 | 190 | 210 | 210 | 210 |
| 泵速（r/min） | 106 | 94 | 75 | 84 | 90 |
| 行程长度（mm） | 250 | 250 | 300 | 300 | 300 |

续表

| 型　　号 | | PZNB-100/2.5 | PZNB-115/2.5 | PZNB-130/2.5 | PZNB-145/2.5 | PZNB-160/2.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 配套电动机 | 额定功率（kW） | 95 | 115 | 115 | 130/125 | 155/145 |
| | 转速（r/min） | 585 | 585 | 585 | 585/580 | 585/580 |
| | 额定电压（V） | 380 | 380 | 380 | 380/3000 | 380/3000 |
| | 型号（1） | JS126-10 | JS127-10 | JS127-10 | JS128-10 | JS137-10 |
| | 型号（2） | | | | JS136-10 | JS137-10 |
| 主泵外形尺寸（mm） | | 4000×2665×2170 | | 4135×2925×2550 | | |
| 配套清洗泵 | 型　　号 | 3DS3（50）-10/6 | | | | |
| | 流量（$m^3/h$） | 10 | | | | |
| | 压力（MPa） | 6 | | | | |
| | 柱塞直径（mm） | 50 | | | | |
| | 泵速（r/min） | 250 | | | | |
| | 行程长度（mm） | 120 | | | | |
| | 配带功率（kW） | 22 | | | | |
| | 电动机型号 | Y200L2-8 | | | | |
| | 外形尺寸（mm） | 2000×1000×700 | | | | |
| 型　　号 | | PZNB-100/4.0 | PZNB-115/4.0 | PZNB-130/4.0 | PZNB-145/4.0 | PZNB-160/4.0 |
| 流量（$m^3/h$） | | 100 | 115 | 130 | 145 | 160 |
| 压力（MPa） | | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| 柱塞直径（mm） | | 170 | 190 | 210 | 210 | 210 |
| 泵速（r/min） | | 106 | 94 | 75 | 84 | 90 |
| 行程长度（mm） | | 250 | 250 | 300 | 300 | 300 |
| 配套电动机 | 额定功率（kW） | 185/200 | 185/200 | 200/280 | 200/280 | 230/310 |
| | 转速（r/min） | 585/580 | 585/580 | 585/590 | 585/590 | 585/590 |
| | 额定电压（V） | 380/3000 | 380/3000 | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 |
| | 型号（1） | JS138-10 | JS138-10 | JS147-10 | JS147-10 | JS147-10 |
| | 型号（2） | JS136-10 | JS136-10 | JS1410-10 | JS1410-10 | JS157-10 |
| 主泵外形尺寸（mm） | | 4000×2665×2170 | | 4135×2925×2550 | | |
| 配套清洗泵 | 型　　号 | 3DS3（50）-10/6 | | | | |
| | 流量（$m^3/h$） | 10 | | | | |
| | 压力（MPa） | 6 | | | | |
| | 柱塞直径（mm） | 50 | | | | |
| | 泵速（r/min） | 250 | | | | |
| | 行程长度（mm） | 120 | | | | |
| | 配带功率（kW） | 22 | | | | |
| | 电动机型号 | Y200L2-8 | | | | |
| | 外形尺寸（mm） | 2000×1000×700 | | | | |

续表

| 型 号 | | PZNB-100/6.0 | PZNB-115/6.0 | PZNB-130/6.0 | PZNB-145/6.0 | PZNB-160/6.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 流量（m³/h） | | 100 | 115 | 130 | 145 | 160 |
| 压力（MPa） | | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| 柱塞直径（mm） | | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| 泵速（r/min） | | 60 | 70 | 75 | 84 | 90 |
| 行程长度（mm） | | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 配套电动机 | 额定功率（kW） | 230/220 | 200/260 | 280/310 | 350/310 | 350/400 |
| | 转速（r/min） | 585/590 | 585/590 | 585/590 | 585/590 | 585/590 |
| | 额定电压（V） | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 |
| | 型号（1） | JS148-10 | JS147-10 | JS1410-10 | JS158-10 | JS158-10 |
| | 型号（2） | JS1410-10 | JS157-10 | JS158-10 | JS158-10 | JS1510-10 |
| 主泵外形尺寸（mm） | | 4135×2925×2550 | | | | |
| 配套清洗泵 | 型 号 | 3DS3（50）-10/8 | | | | |
| | 流量（m³/h） | 10 | | | | |
| | 压力（MPa） | 8 | | | | |
| | 柱塞直径（mm） | 50 | | | | |
| | 泵速（r/min） | 250 | | | | |
| | 行程长度（mm） | 120 | | | | |
| | 配带功率（kW） | 22 | | | | |
| | 电动机型号 | Y200L2-8 | | | | |
| | 外形尺寸（mm） | 2000×1000×700 | | | | |

| 型 号 | | PZNB-100/8.0 | PZNB-115/8.0 | PZNB-130/8.0 | PZNB-145/8.0 | PZNB-160/8.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 流量（m³/h） | | 100 | 115 | 130 | 145 | 160 |
| 压力（MPa） | | 8.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 |
| 柱塞直径（mm） | | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| 泵速（r/min） | | 60 | 70 | 75 | 84 | 90 |
| 行程长度（mm） | | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 配套电动机 | 额定功率（kW） | 280/310 | 280/400 | 350/400 | 430/400 | 430/480 |
| | 转速（r/min） | 585/590 | 585/590 | 585/590 | 590/590 | 590/590 |
| | 额定电压（V） | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 | 3000/6000 |
| | 型号（1） | JS1410-10 | JS1410-10 | JS158-10 | JS1510-10 | JS1510-10 |
| | 型号（2） | JS158-10 | JS1510-10 | JS1510-10 | JS1510-10 | JS1512-10 |

续表

| 型　　号 | | PZNB-100/8.0 | PZNB-115/8.0 | PZNB-130/8.0 | PZNB-145/8.0 | PZNB-160/8.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 主泵外形尺寸（mm） | | 4135×2925×2550 | | | | |
| 配套清洗泵 | 型　　号 | 3DS3（50）-10/10 | | | | |
| | 流量（$m^3/h$） | 10 | | | | |
| | 压力（MPa） | 10 | | | | |
| | 柱塞直径（mm） | 50 | | | | |
| | 泵速（r/min） | 250 | | | | |
| | 行程长度（mm） | 120 | | | | |
| | 配带功率（kW） | 37 | | | | |
| | 电动机型号 | Y250M-8 | | | | |
| | 外形尺寸（mm） | 2000×1000×700 | | | | |

## 五、布置设计

1. 离心式灰渣浆泵

（1）渣浆泵宜布置在锅炉房内，灰浆泵房宜靠近制浆设施布置。

（2）灰渣浆泵根据设备要求和具体布置地点条件可采用低位或高位布置。设计时应保证泵的有效汽蚀余量大于泵的必需汽蚀余量。

（3）同一泵房内装设有多台灰渣浆泵时，相邻两台泵之间的通道宽度不应小于1.2m。

（4）灰渣浆泵房前应设有灰渣缓冲池，缓冲池的有效容积应按泵的3～5min设计流量选取，并应设有防止灰渣沉积的措施。

（5）灰渣浆泵低位布置时，泵房设计应满足：①灰渣浆泵电动机的底座应高出泵房地面200～300mm；②泵房的泵坑内应设置2台排污泵，1台运行，1台备用，排污泵的流量可为30～50$m^3/h$；③当采用轴封水密封时，其轴封水泵应布置在泵房的0m层；④灰渣浆泵进口管道上应装设阀门和补偿设施；⑤在0m层以下，灰渣管和电缆的穿墙处应密封，在泵房泵坑内不应设置电缆沟；⑥值班控制、检修场地应布置在0m层。

（6）灰渣浆泵高位布置时，泵房的设计应满足：①在同一池内，各灰渣浆泵吸入管的入口应靠近布置；②在灰渣浆泵处应设有启动措施；③泵房内排水宜排至灰渣池内。

（7）当灰渣浆泵直接串联时，应满足下列要求：

1）泵和管道的总体布置，宜使每台泵的出口与相应次级泵的入口以最短管道相接，连接的管道上应考虑补偿措施，以减少轴向荷载及振动的传递。

2）灰渣浆泵串联有泵轴平行的布置方式和泵轴垂直的布置方式，泵可以安装于同一高度或不同的高度，如图3-83所示。

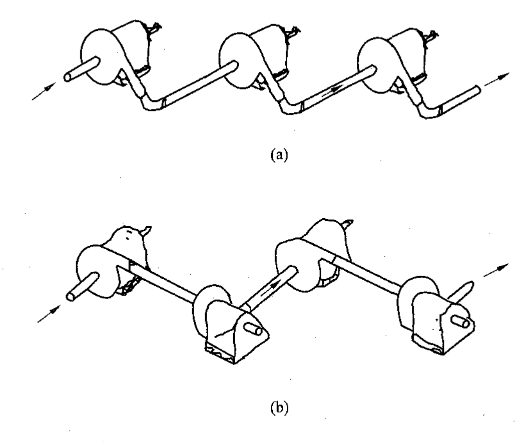
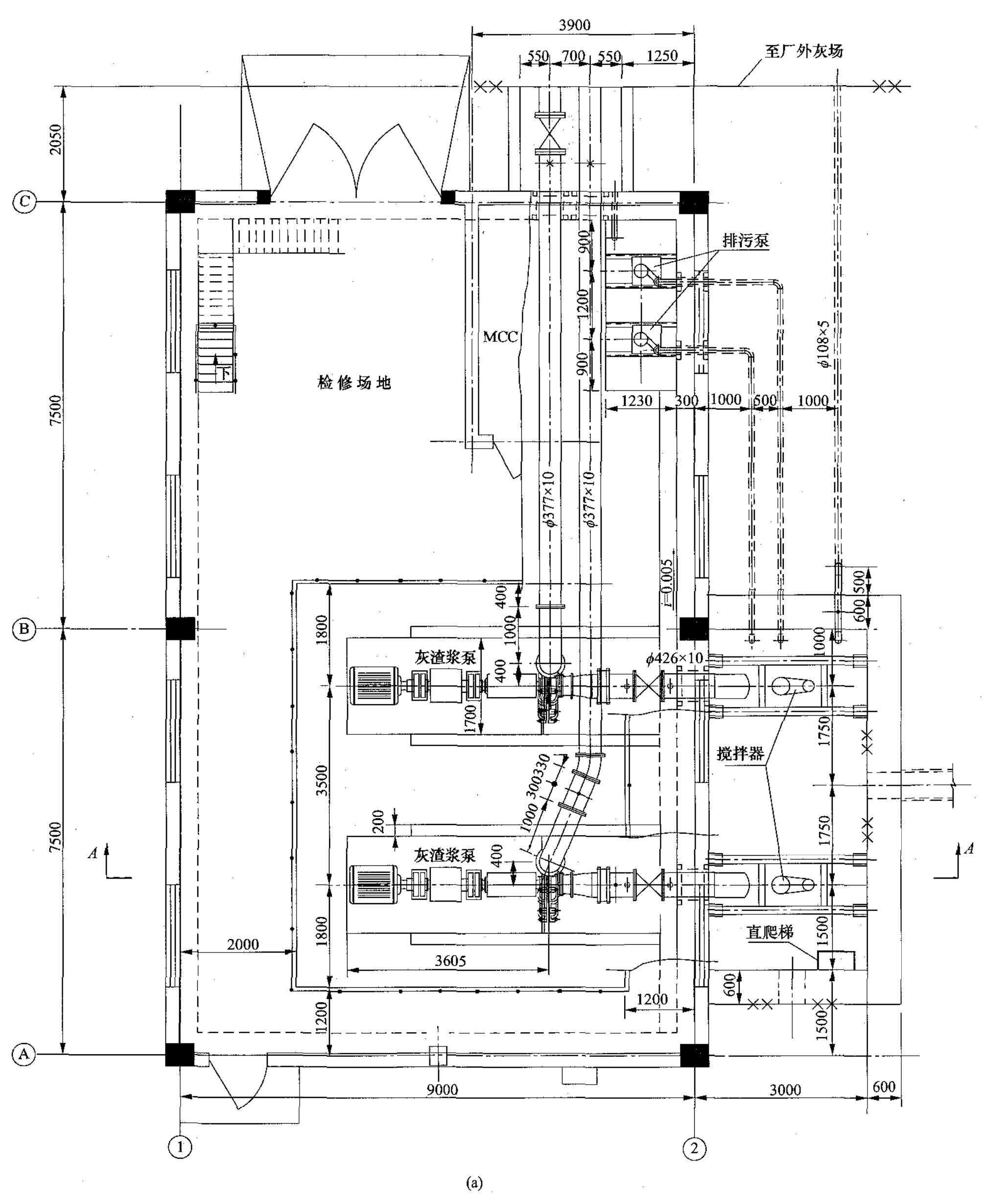



图3-83　灰渣浆泵串联布置方式
（a）平行轴布置；（b）垂直轴布置

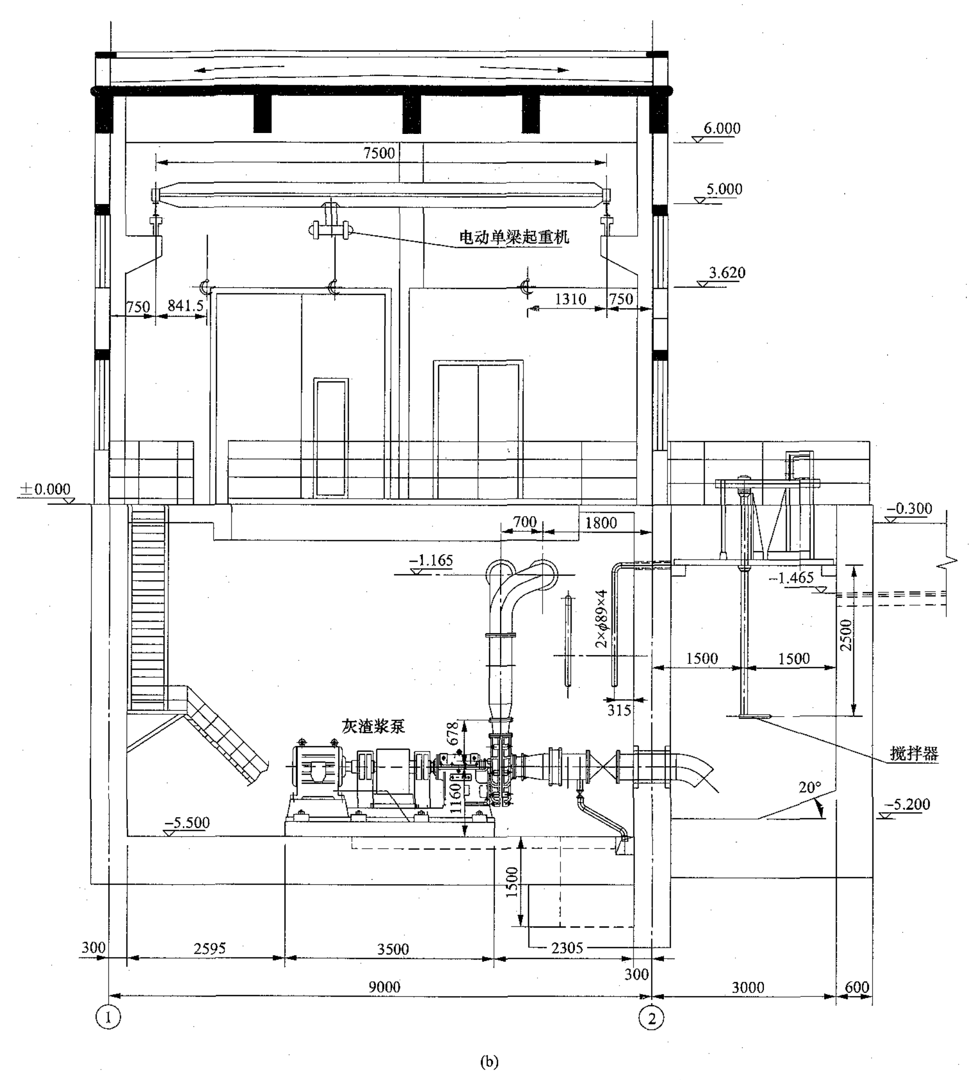
3）泵轴平行的方式，布置紧凑、占地面积小，但连接管急速转弯，磨损较严重。泵轴垂直的方式，占地面积稍大，但连接管的磨损较轻，可根据工程的实际情况选择合适的布置方式。

（8）灰渣浆泵（含渣浆泵、灰浆泵）推荐采用单泵单管制设计，不宜采用单泵多管制或多泵单管制设计。典型灰渣浆泵房布置如图3-84所示。




(a)

图 3-84　典型灰渣泵房布置图（一）
（a）平面布置图




(b)

图3-84 典型灰渣泵房布置图（二）

（b）*A-A* 断面图

2. 柱塞式灰浆泵

（1）柱塞式灰浆泵进出口管道上应设空气罐或其他缓冲设施，出口空气罐宜布置在室外。

（2）柱塞式灰浆泵房内应设置供冲洗、密封柱塞用的清洁、可靠、连续的水源，水量、水压由制造厂提供。

（3）柱塞式灰浆泵的入口压力应由制造厂提供，如果柱塞泵需要给浆泵增加压力时，给浆泵与柱塞泵宜单元连接，给浆泵的流量与出口扬程均应按照柱塞泵的技术要求选择。

（4）柱塞式灰浆泵房内根据需要设1台空气压缩机，其容量为 0.3～0.5$m^3$/min，压力宜为泵额定压力的80%。

（5）柱塞式灰浆泵房的设计应满足：①相邻两台泵之间净距不宜小于2.5m；②泵房宜地上布置。

典型柱塞式灰浆泵房布置见图3-85。

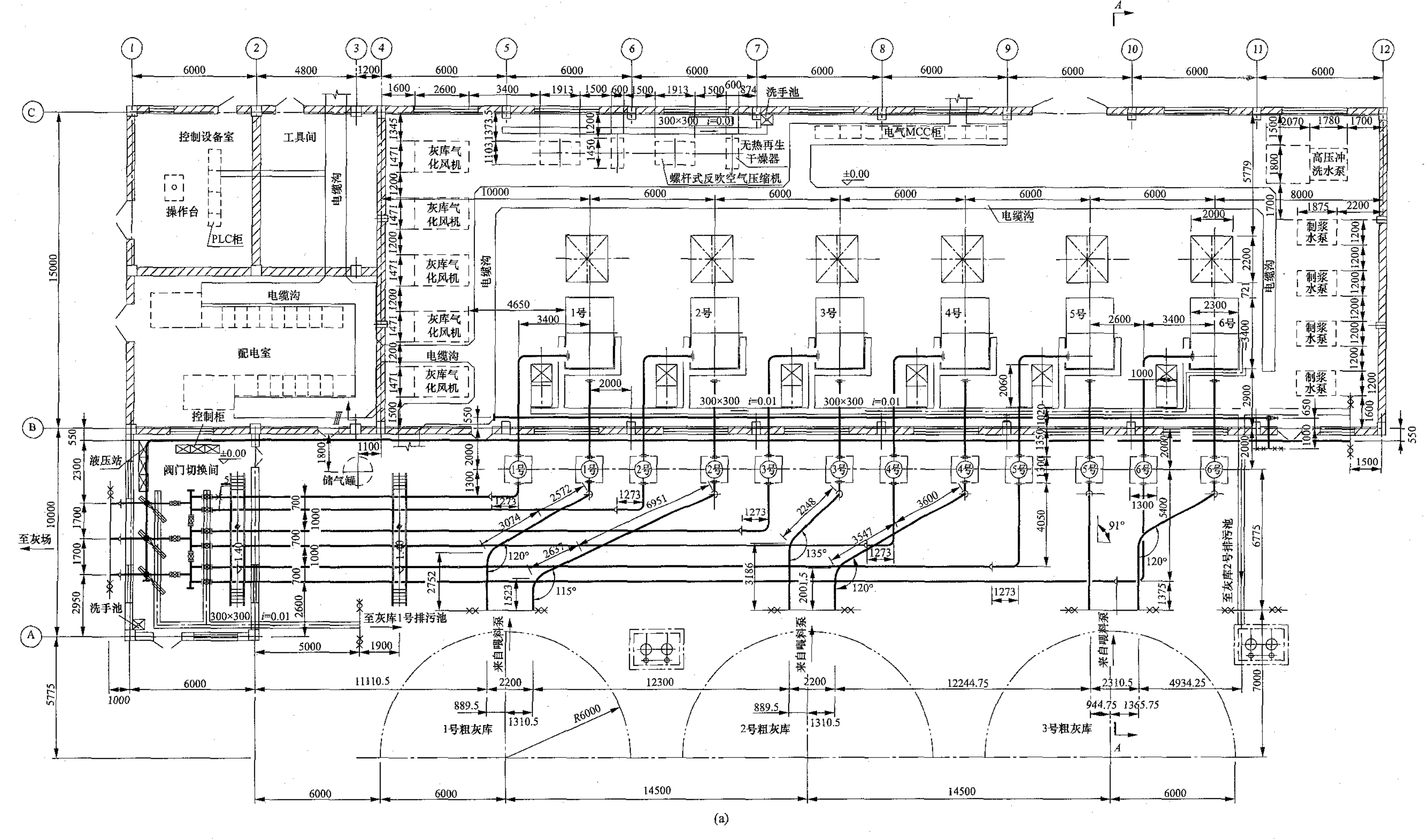
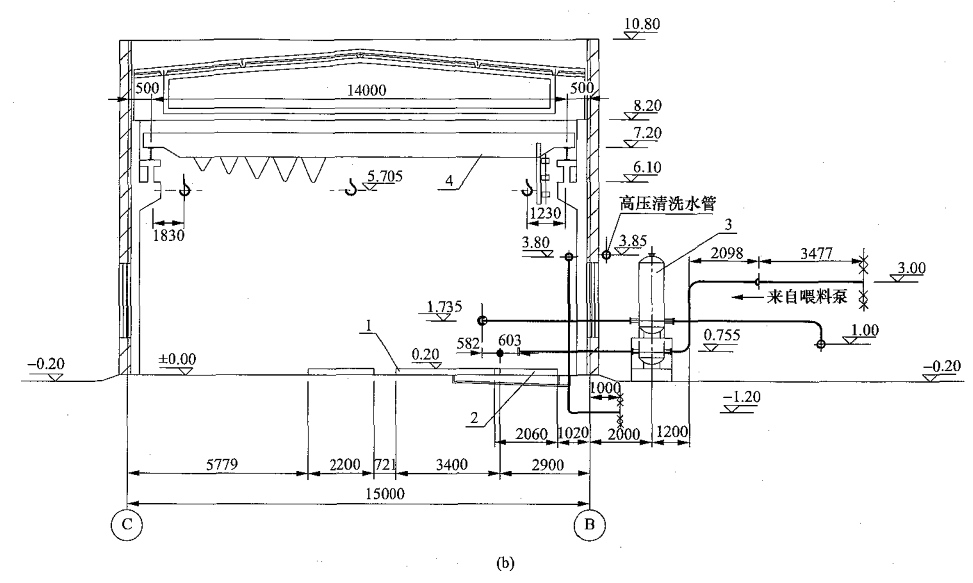



图 3-85 典型柱塞式灰浆泵房布置图（一）

（a）平面布置图




(b)

图 3-85　典型柱塞式灰浆泵房布置图（二）

（b）*A-A* 断面图

1—柱塞式灰浆泵；2—清水泵；3—出口缓冲罐；4—电动单梁桥式起重机

3. 水力输送管道布置设计要求

（1）厂区内的渣浆管、灰渣浆输送管道宜地下布置，厂区外的灰渣浆输送管道宜地上布置，管道上的切换阀门宜地上布置并维护检修方便。

（2）渣浆管、灰渣浆管布置在管沟内，且管沟深度大于 1.5m 时，管沟应设有人行通道和排水设施，人行通道净宽度宜为 800mm。

（3）当厂房外渣浆管底部磨损后，每隔二、三年需要翻转 120°，厂房外灰渣浆管宜采用卡箍式快装管接头的连接方式，不宜全部采用焊接方式。支架的安装间距应满足管道壁厚磨损到 4mm 时的间距要求，快装管接头的间距及管接头内间隙应满足管道最大温差工况下的热胀冷缩的要求。

（4）在灰渣浆泵出口管上应根据管线布置及切换要求等具体情况装设渣浆阀门，当灰场标高高于泵的出口而且标高相差较大时，宜装设缓闭止回阀。

水力输送管道布置除了满足上述设计要求外，还应满足以下标准中关于管道布置的要求：GB 50764—2012《电厂动力管道设计规范》、DL/T 5032《火力发电厂总图运输设计技术规范》、DL/T 5054—2016《火力发电厂汽水管道设计技术规范》、DL/T 5204—2016《发电厂油气管道设计规程》。

4. 水力输送管道支架和补偿器设置设计要求

水力输送管道宜按管道自补偿方式设计，当管道直管段较长自补偿无法满足热胀冷缩要求时宜加设补偿器。管道支架及补偿器设计，应符合下列规定：

（1）管道支吊架的间距应满足强度条件和刚度条件。

（2）当采用自然补偿时，在每段直管段中点（或接近中点处）应设置固定支架，管道转弯处设置滑动支架。

（3）当采用伸缩节补偿时，在两个伸缩节之间的直管段中点（或接近中点处）应设置 1 个固定支架，其余为导向支架或滑动支架。伸缩节和弯头之间应设置 1 个固定支座，弯头附近的支架宜为滑动支架。

（4）当采用快装管接头补偿时，每节管道至少应设置一个支架，固定支架的位置根据管线布置情况确定。

（5）伸缩节的安装长度和快装管接头的安装间隙，应根据管道中灰渣浆混合温度（或当地最低气温）与安装时的气温差计算确定。

## 六、计算举例

某火力发电厂二期工程建设 2×300MW 燃煤机组，锅炉为钢球磨中储式制粉、固态排渣煤粉炉，配用四电场静电除尘器，厂外灰场为水灰场。该工程除渣系统如图 3-86 所示，水力输灰系统如图 3-87 所示。

1. 原始资料

（1）锅炉形式：固态排渣煤粉炉，每炉配置 1 台刮板捞渣机。

（2）除尘器：双室四电场静电除尘器，每台炉 16 个灰斗，除尘效率为 99.63%。

（3）省煤器灰斗：每台炉 4 个。

（4）空气预热器灰斗：每台炉 8 个。

（5）煤质资料及耗煤量，见表 3-31。

表3-31 煤质资料及耗煤量

| 序号 | 名称 | 符号 | 单位 | 设计煤种 | 校核煤种 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 硫 | $S_{t,ar}$ | % | 2.37 | 2.8 |
| 2 | 灰分 | $A_{ar}$ | % | 32 | 35.2 |
| 3 | 收到基水分 | $M_{ar}$ | % | 7.5 | 8.15 |
| 4 | 低位发热量 | $Q_{net,ar}$ | MJ/kg | 20.02 | 19.49 |
| 5 | 1×300MW机组小时耗煤量 | $G_m$ | t/h | 143.2 | 147 |

（6）火力发电厂主厂房零米海拔高程为343.0m。灰场位于厂区东侧，距火力发电厂直线距离约2.5km。初期坝采用碾压式石渣坝，该期采用灰渣筑子坝，逐级加高，最终坝顶标高为351m。

2. 除灰渣系统设计原则

除灰渣系统采用灰渣分除、厂内气力集中、粗细分开、厂外采用灰渣泵输送至灰场的方式。

3. 灰渣量

经过计算，1×300MW机组锅炉额定负荷运行燃烧设计煤种时的灰渣量为：灰39.51t/h，渣7.0t/h。

4. 除渣系统

锅炉炉渣连续落入刮板捞渣机上槽体，炉渣经水冷却和粒化后，由刮板捞渣机捞出排入碎渣机。炉渣经碎渣机破碎后，从落料口排入埋刮板输送机，由埋刮板输送机输送至斗式提升机进口，由斗式提升机输送至渣仓。当一台渣仓装满后，通过渣仓顶部的埋刮板输送机切换至另一台渣仓运行。渣仓设有析水元件，以对含水率较高的湿渣进一步脱水，脱水后的湿渣由综合利用用户的汽车外运。渣仓析水自流进入地面的汇水池，由泵送往灰沟，进入灰渣浆泵房前池，最后由灰渣浆泵输送至灰场。当没有综合利用用户时，刮板捞渣机的排渣可通过电动阀切换至渣沟进入集水池（渣池），由排渣泵（液下泵）中转至灰渣泵房的前池，最终与省煤器、空气预热器、电除尘器的灰浆一道通过灰渣浆泵输送至灰场。

5. 除灰系统

电除尘器一、二、三、四电场每个灰斗下设1台飞灰输送器将飞灰输送至灰库。每座灰库下部设有2台水力混合器，灰库排灰由水力混合器制成灰浆，然后，沿灰沟自流至灰渣浆泵房前池，再由灰渣浆泵经灰管输送至灰场。每座灰库下还设有1台汽车散装机，以便需要取用干灰时使用。

6. 省煤器、空气预热器灰处理

省煤器、空气预热器下的灰经插板门、电动锁气器排入箱式冲灰器，制浆后经灰沟进入灰渣浆池内，与灰渣浆一道由灰渣浆泵通过管道输送至灰场。

7. 计算结果

水力计算结果见表3-32。

表3-32 水力计算结果表

| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 方案描述：省煤器灰及渣不供综合利用全部用泵送至灰渣浆泵房前池；空气预热器灰斗平时不放灰，仅在检修时冲洗；灰在灰库处制浆，灰沟进入灰渣浆泵房前池。所有的灰渣浆由灰渣浆泵输送至灰场 | | | | | |
| 2 | 每台锅炉渣量 | $G_z$ | t/h | 根据灰渣量公式计算获得 | 7.0 | |
| 3 | 每台锅炉灰量 | $G_h$ | t/h | 根据灰渣量公式计算获得 | 39.51 | |
| 4 | 每台锅炉省煤器灰量 | $G_{sh}$ | t/h | 根据灰渣量公式计算获得 | 2.34 | |
| 5 | 捞渣机耗水（水质为循环水排水或工业水）：采用捞渣机除渣，按熄火水量考虑（循环倍率取$k=10$） | | | | | |
| （1） | 捞渣机耗水量 | $Q_x$ | m³/h | $Q_x=10G_z$ | 70.0 | |
| （2） | 排入渣沟的水量 | $Q_{zg}$ | m³/h | 蒸发系数取为0.2，$Q_{zg}=(1-0.2)Q_x$ | 56.0 | 式（3-18） |
| （3） | 渣沟激流喷嘴耗水量 | $Q_{zpz}$ | m³/h | 2只$\phi 10$喷嘴，$2\times7.37=14.74$ | 14.74 | 查表3-35或按式（3-20）计算 |
| 6 | 渣系统总耗水量（一台炉） | $Q_{zs1}$ | m³/h | $Q_{zs1}=Q_x+Q_{zpz}=70+14.74$ | 84.75 | |
| | 渣系统总耗水量（两台炉） | $Q_{zs}$ | m³/h | $Q_{zs}=2\times Q_{zs1}=2\times84.75$ | 169.49 | |
| 7 | 一台炉进入灰渣浆泵房的渣浆量 | $G_{zj1}$ | m³/h | $G_{zj1}=Q_{zg}+Q_{zpz}+G_z/2.2=56+14.74+7/2.2$ | 73.92 | 渣的真实密度为2.2t/m³ |
| | 两台炉进入灰渣浆泵房的渣浆量 | $G_{zj}$ | m³/h | $G_{zj}=2G_{zj1}=2\times73.92$ | 147.84 | |

续表

| 序号 | 项　目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 省煤器灰浆量 | | | | | |
| （1） | 省煤器灰的容积 | $G_{sh}$ | $m^3/h$ | $G_{sh}=G_{sh}/2.0=2.34/2$ | 1.17 | 灰的真实密度为 $2.0t/m^3$ |
| （2） | 冲灰器耗水量 | $Q_{shc}$ | $m^3/h$ | 4 台 2t/h 箱式冲灰器，$1\times\phi10$；$4\times7.37=29.48$ | 29.48 | 查表 3-35 |
| （3） | 激流喷嘴水量 | $Q_{spz}$ | $m^3/h$ | 2 只 $\phi10$ 喷嘴，$2\times7.37=14.74$ | 14.74 | 查表 3-35 或按式（3-20）计算 |
| （4） | 每炉省煤器灰浆量 | $G_{shs1}$ | $m^3/h$ | $G_{shs1}=G_{sh}+Q_{shc}+Q_{spz}=1.17+29.48+14.74$ | 45.39 | |
| （5） | 进入灰渣浆泵的省煤器灰浆量 | $G_{shs}$ | $m^3/h$ | 按定期运行考虑，两台炉错开运行，因此，按一台炉的量计算：$G_{shs}=G_{shs1}$ | 45.39 | |
| （6） | 每台炉省煤器下循环水排水耗量 | $Q_{shs}$ | $m^3/h$ | $Q_{shs}=Q_{shc}+Q_{spz}=29.48+14.74$ | 44.22 | |
| 9 | 灰库制浆后的灰浆量 | | | | | |
| （1） | 3 个灰库共 6 台水力混合器，同时共运行 2 台，每台出力 40t/h 干灰，每台电动给料机出力 $60m^3/h$ | | | | | |
| （2） | 灰的容积 | $G_{hkh}$ | $m^3/h$ | $G_{hkh}=80/2.0$，80t/h 干灰约为 $40m^3/h$ | 40.0 | 灰的真实密度为 $2.0t/m^3$ |
| （3） | 水量（按 1:4 的灰水比计算） | $Q_{hks}$ | $m^3/h$ | $Q_{hks}=4\times80$ | 320.0 | |
| （4） | 灰沟内激流喷嘴耗水量 | $Q_{kpz}$ | $m^3/h$ | 6 只 $\phi10$ 喷嘴，$6\times7.37=44.22$ | 44.22 | 查表 3-35 或按式（3-20）计算 |
| （5） | 灰库内产生的总灰浆量 | $G_{khj}$ | $m^3/h$ | $G_{khj}=G_{hkh}+Q_{hks}+Q_{kpz}=40+320+44.22$ | 404.22 | |
| 10 | 所要输送的灰渣浆总量 | $G_{hzs}$ | $m^3/h$ | $G_{hzs}=G_{zj}+G_{shs}+G_{khj}=147.84+45.39+404.22$ | 597.45 | |
| 11 | 灰渣管阻力计算：灰渣混除，即灰、渣都不综合利用全部进入灰渣泵房系统输送至灰场 | | | | | |
| （1） | 灰渣浆前池渣浆总量 | | | | | |
| 1） | 灰渣浆池激流喷嘴耗水量 | $Q_{zj}$ | $m^3/h$ | 2 只 $\phi10$ 喷嘴，$2\times7.37=14.74$ | 14.74 | 查表 3-35 或按式（3-20）计算 |
| 2） | 灰渣浆前池灰渣浆总量 | $G_{hu}$ | $m^3/h$ | $G_{hu}=G_{hzs}+Q_{zj}=597.45+14.74$ | 612.19 | |
| （2） | 灰渣浆管管径选择 | | | | | |
| 1） | 初选管内介质流速 | $v_c$ | m/s | 灰渣管，选 1.6 | 1.6 | |
| 2） | 以初选流速确定的管径 | $d_j$ | m | $d_j=[4\times G_{hu}/(3600\times\pi\times1.6)]^{1/2}$ | 0.3679 | 式（3-37） |
| 3） | 按 $d_j$ 选择 $\phi377\times10$ 钢管，则管道内径 $d_n$ 为 0.357m | | | | 0.357 | |
| 4） | 实际流速 | $v'$ | m/s | $v'=4\times G_{hu}/(3600\times\pi\times0.357^2)$ | 1.7 | 式（3-38） |
| （3） | 灰浆的密度 | $\rho_{hu}^{h}$ | $t/m^3$ | $\rho_{hu}^{h}=[G_h+1\times(G_{hu}-G_z/2.2-G_h/2.0)]/G_{hu}$ | 1.027 | 式（3-43） |
| （4） | 灰渣浆密度 | $\rho_{hu}$ | $t/m^3$ | $\rho_{hu}=[G_z+G_h+1\times(G_{hu}-G_z/2.2-G_h/2.0)]/G_{hu}$ | 1.0385 | 式（3-45） |
| （5） | 阻力系数 | | | | | |
| 1） | 管道绝对粗糙度 | $\varepsilon$ | | 按表 3-25 选取 | 0.3 | |
| 2） | 雷诺数 | $Re$ | | $Re=(0.357\times1.7)/(0.553\times10^{-6})$ | $1.097\times10^6$ | 按附录公式 |
| 3） | 清水阻力系数 | $\lambda_s$ | | $Re\geqslant10^6$，采用式（3-42）<br>$\lambda_s=1/[1.14+2\times\lg(357/\varepsilon)]^2$ | 0.0188 | 式（3-42） |
| 4） | 渣的附加阻力系数 | | | | | |
| a） | 灰渣浆中渣的质量稠度 | $\mu_z$ | % | $\mu_z=G_z/[(G_{hu}-G_z/2.2-G_h/2.0)\rho_{sh}]$ | 2.47% | 式（3-46） |
| b） | 质量稠度的粒度修正 | $\mu'_z$ | | $\mu'_z=(1-0.4)\mu_z$ | 1.48% | 式（3-47） |

续表

| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算公式或依据 | 计算结果 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| c) | 渣的附加阻力系数 | $\lambda_z$ | | 据 $\mu_z'=1.48\%$ 和 $v=1.7$m/s 查表 3-28 | 0.52% | |
| 5) | 渣浆管的阻力系数 | $\lambda$ | | $\lambda=\rho_{hu}^{h}\lambda_s+\lambda_z=1.027\times0.0188+0.0052$ | 0.0245 | 式（3-52） |
| (6) | 局部阻力系数 | $\xi$ | | 选取 $\xi=5\%$ | 0.05 | |
| (7) | 灰管长度 | $L$ | m | 单根灰管长度 $L$=3500m（一期放灰点）+1135m（本期最远放灰点） | 4635 | |
| (8) | 提升高度 | $H$ | m | 提升高差 351–343=8m，泵坑深度 5m | 13 | |
| (9) | 灰管的阻力 | $H_{hz}$ | kPa | $H_{hz}=9.81\times[(1+0.05)\lambda v'^2 L/(2gd_n)+\rho_{hu}H]$ | 496.12 | 式（3-54） |
| (10) | 灰渣浆泵选泵流量 | $G_{hu}'$ | m³/h | $G_{hu}'=1.1Q_{hu}=1.1\times612.19$ | 673.41 | 式（3-57） |
| (11) | 灰渣浆泵选泵扬程 | $H_{hz}'$ | kPa | $H_{hz}'=1.1H_{hz}=1.1\times496.12$ | 545.7 | 式（3-58） |
| (12) | 查相关设备厂家资料，初步选择 200ZJ-1-A58，流量 211～841m³/h，扬程 13～57.9m，转速 980r/min，电动机 Y355M1-6，160 kW/380V，$\eta=79\%$ | | | | | |
| (13) | 电动机功率核算 | | | | | |
| 1) | 灰渣浆泵的轴功率 | $P_e$ | kW | $P_e=(G_{hu}'H_{hz}'\rho_{hu})/(3600\eta)=(673.41\times545.7\times1.0385)/(3600\times0.79)$ | 134.19 | 式（3-59） |
| 2) | 灰渣浆泵电动机的额定功率 | $P_M$ | kW | $P_M=K_4P_e=1.15P_e$ | 154.32 | 式（3-60） |
| 由计算结果可知，所配的电动机功率满足要求 | | | | | | |

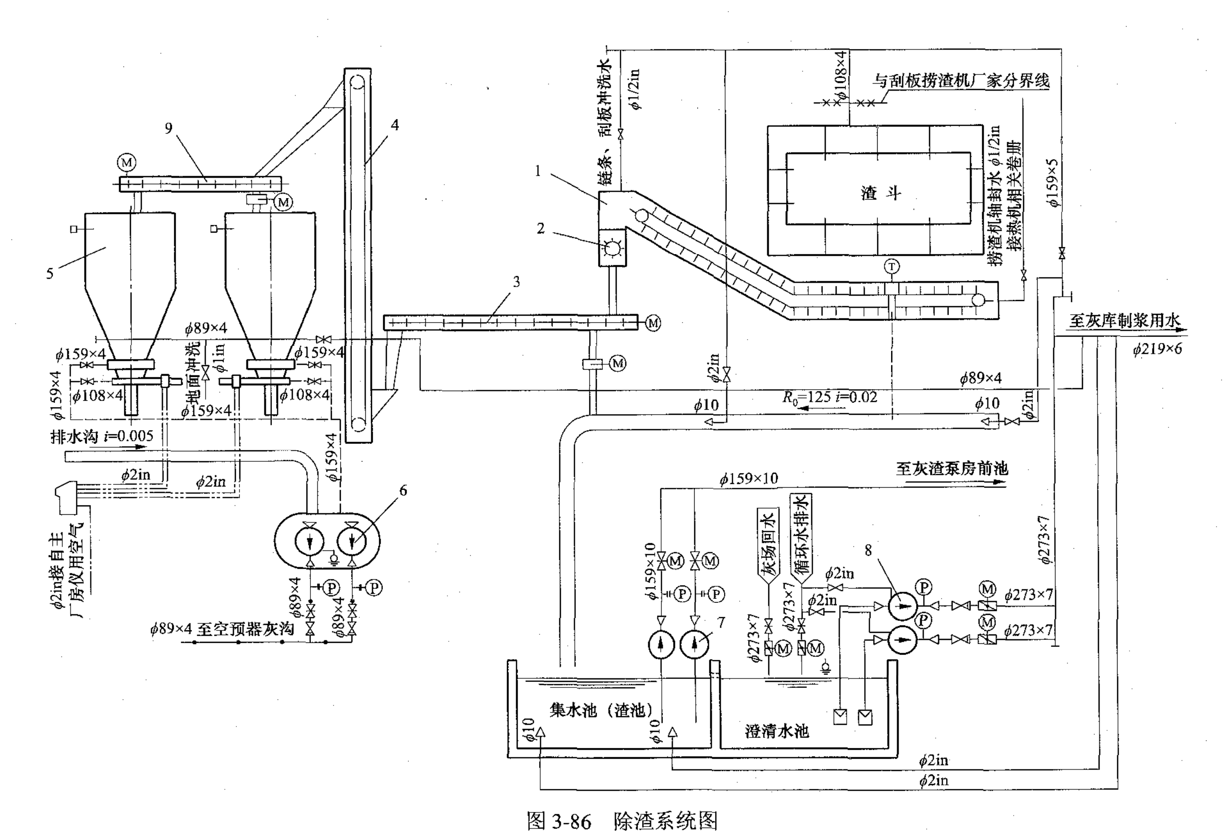



图 3-86 除渣系统图

1—刮板捞渣机；2—单辊碎渣机；3—埋刮板输送机；4—斗式提升机；5—渣仓；6—立式排污泵；7—液下泵；8—除灰水泵；9—渣仓顶埋刮板输送机

图 3-87　水力输灰系统图

1—水力混合器；2—搅拌器；3—排污泵；4—灰渣泵；5—电动单梁起重机

# 第五节　制浆和沉渣池系统

## 一、制浆系统

### （一）系统简介

采用湿式贮灰场时，飞灰宜经制浆后水力输送至灰场。制浆系统由制浆设备、管道、阀门等组成。其功能是将电厂的干灰利用制浆设备制成合适浓度的灰浆，以便后续进行水力输送。其设计范围从灰库/灰斗下法兰起到制浆设备出口止。在水力输送系统中，制浆系统主要用在灰库下干灰制浆（对于小型电厂也可用于除尘器下制浆）。干灰由电动给料机控制给料进入制浆设备，与水混合后制成灰浆，用于后续的设备进行水力输送。典型的制浆系统见图 3-88，其中制浆设备为水力混合器，常用的制浆设备还有搅拌筒、箱式冲灰器等，可根据设备的出力和耗水量选择。

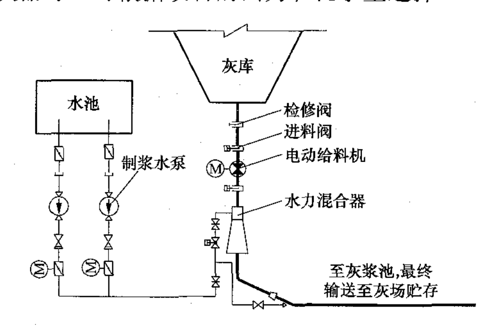



图 3-88　典型的制浆系统图

（二）设计要求

（1）水力输灰系统浆体浓度宜符合：①高浓度浆体的质量浓度不宜小于 25%，且不宜大于 40%；②中等浓度浆体的质量浓度不宜小于 15%，且不宜大于 25%。

（2）制浆系统取料口下应设有手动隔离阀门、气动关断阀门和电动给料机。

（3）制浆系统应配备补气口，满足混合室形成真空环境，确保灰水不会反流到卸灰设备、管道，甚至灰库。

（4）灰水混合器的配置数量应根据要求的制浆灰量及设备的出力计算确定。当灰库间已实现互为备用时，制浆设备备用量不宜少于 1 套。当灰库间不能实现互为备用时，每库的制浆设备均应设有备用。

（5）灰水混合器的进水含固体颗粒粒径应小于混合器喷水间隙，必要时加设过滤装置。水混合器的供水压力根据制造厂资料确定，无资料时可取 0.5～0.7MPa。

（6）灰水混合器制浆设备下方的灰浆管道宜尽量短直，减少 90°弯头数量。因布置需要水平输送一段距离的灰浆管道应采取利于（中）高浓度灰浆流动的布置，如采用大曲率半径的弯头和加设辅助助流水源。

（7）搅拌装置的有效容积应为 4～6min 排灰浆设备的设计流量；耗水量应按输送浓度确定。

（三）设备选型

一般情况下，干灰出力小于 10t/h 时，优先采用箱式冲灰器；干灰出力为 10～40t/h 时，优先采用搅拌桶或水力混合器。干灰出力大于 40t/h 时则选用水力混合器。

1. 搅拌筒

搅拌筒是一机械搅拌装置，主要用于干灰制浆。其工作原理是：干灰由进料口进到搅拌筒内，叶轮在电动机的带动下产生旋转，干灰在水流的作用下产生环形运动达到与水混合。搅拌好的灰浆从溢流口排出。

搅拌筒的特点：①结构紧凑，密封性好；②搅拌均匀，出料迅速；③喷嘴多排设置，水量均匀并可调节。

常见 XJ 型搅拌桶主要技术参数及外形尺寸见表 3-33。搅拌桶外形见图 3-89。

表 3-33　常见 XJ 型搅拌桶主要技术参数及外形尺寸

| 型　号 | | XJ-1500 | XJ-2000 | XJ-2500 | XJ-3000 |
|---|---|---|---|---|---|
| 有效容积（$m^3$） | | 2.3 | 5.6 | 11.2 | 18 |
| 处理灰量（t/h） | | 6 | 15 | 30 | 40 |
| 灰水比 | | 1:（2～2.5） | 1:（2～2.5） | 1:（2～2.5） | 1:（2～2.5） |
| 叶轮直径（mm） | | 400 | 500 | 600 | 850 |
| 主轴转速（r/min） | | 280 | 290 | 270 | 250 |
| 电动机功率（kW） | | 5.5 | 7.5 | 11 | 22 |
| 外形连接尺寸（mm） | $D$ | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |
| | $H$ | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |
| | $C$ | 2484 | 3116 | 3848 | 4311 |
| | $D_N$ | 150 | 150 | 200 | 250 |
| | $\phi$ | 225 | 225 | 280 | 335 |
| | $n$-$d$ | 8-$\phi$18 | 8-$\phi$18 | 8-$\phi$18 | 12-$\phi$18 |
| | $H_1$ | 1030 | 1500 | 1950 | 2400 |
| | $H_2$ | 100 | 100 | 130 | 160 |
| | $H_3$ | 250 | 250 | 250 | 300 |
| | $E$ | 550 | 710 | 920 | 1080 |

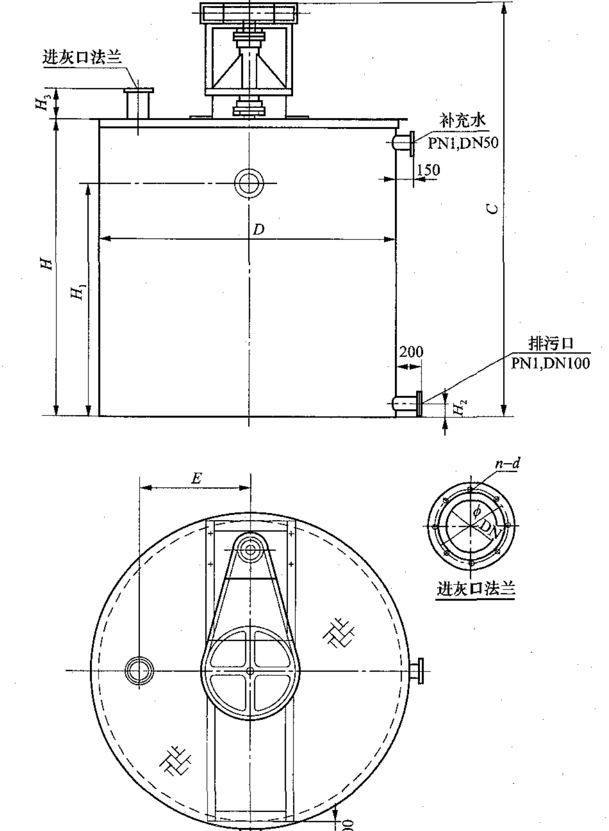



图 3-89　搅拌桶外形图

2. 水力混合器

水力混合器的结构和蒸汽抽气器相似。其工作原理是：压力水从环形喷嘴进入，在混合室产生一定的负压，把干灰从中间吸入，灰水在混合室里充分混合后，再经扩压室送出，排入灰浆池。

水力混合器由吸口喷嘴（可进行调节）、泵体、混合室、扩压室主要部件组成。

常见水力混合器主要技术参数见表 3-34，结构及外形见图 3-90。

**表 3-34　常见水力混合器主要技术参数**

| 序号 | 项　目 | 规格 1 | 规格 2 |
|---|---|---|---|
| 1 | 工作压力（MPa） | 0.6～0.7 | 0.6～0.7 |
| 2 | 最大工作压力（MPa） | 0.8 | 0.8 |
| 3 | 灰水比 | 1:1.5～1:2.5 | 1:1.5～1:2.5 |

续表

| 序号 | 项　目 | 规格 1 | 规格 2 |
|---|---|---|---|
| 4 | 最大处理量（t/h） | 10～30 | 30～70 |
| 5 | 进灰管直径 DN（mm） | 150 | 200 |
| 6 | 喉部内径（mm） | 200 | 200 |
| 7 | 扩散管直径（mm） | 200 | 250 |
| 8 | 喷嘴直径（mm） | 10 | 12 |
| 9 | 喷嘴数量（只） | 18 | 20 |

PN10,DN200
防堵排浆口法兰
PN10,DN200
进水口法兰
PN10,DN200
1220
899

图 3-90　水力混合器结构及外形图

3. 箱式冲灰器

箱式冲灰器的工作原理：干灰由进料口进到箱式冲灰器内，高压水通过喷嘴进入箱式冲灰器内产生切向环形运动，干灰在水流的作用下与水混合成灰浆。混合好的灰浆从排浆口排出。

常见箱式冲灰器主要技术参数见表 3-35。箱式冲灰器有单喷嘴和双喷嘴两种形式，其外形见图 3-91。

表 3-35　　常见箱式冲灰器主要技术参数

| 干灰出力（t/h） | 喷嘴直径（mm） | 水压 0.5MPa 水量（$m^3/h$）/灰水比 | 水压 0.6MPa 水量（$m^3/h$）/灰水比 | 水压 0.7MPa 水量（$m^3/h$）/灰水比 | 水压 0.8MPa 水量（$m^3/h$）/灰水比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | $\phi$10 | 6.58/1:3.29 | 7.37/1:3.69 | 8.05/1:4.03 | 8.42/1:4.21 |
| 3 | $\phi$12 | 9.62/1:3.2 | 10.45/1:3.48 | 11.35/1:3.78 | 12.15/1:4.05 |
| 4 | $\phi$14 | 13.2/1:3.3 | 14.3/1:3.58 | 15.45/1:3.86 | 16.65/1:4.16 |
| 5 | $\phi$14 | 13.2/1:2.64 | 14.3/1:2.86 | 15.45/1:3.09 | 16.65/1:3.33 |
| 6 | 2×$\phi$12 | 19.24/1:3.2 | 20.9/1:3.48 | 22.7/1:3.78 | 24.3/1:4.05 |
| 7 | 2×$\phi$14 | 26.4/1:3.77 | 28.6/1:4.08 | 30.9/1:4.41 | 33.3/1:4.76 |
| 8 | 2×$\phi$14 | 26.4/1:3.3 | 28.6/1:3.58 | 30.9/1:3.86 | 33.3/1:4.16 |
| 9 | 2×$\phi$16 | 34.0/1:3.77 | 37.2/1:4.13 | 40.4/1:4.48 | 43.2/1:4.8 |
| 10 | 2×$\phi$16 | 34.0/1:3.4 | 37.2/1:3.72 | 40.4/1:4.04 | 43.2/1:4.32 |

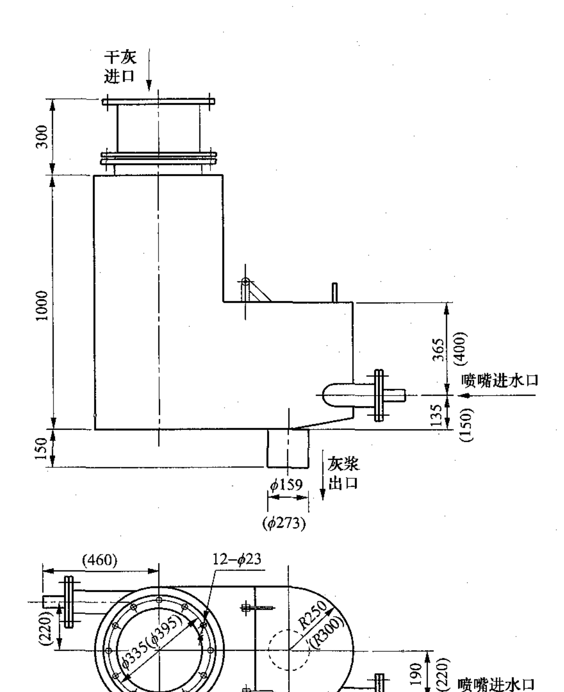



图 3-91　箱式冲灰器外形图

说明：2～5t 箱式冲灰器只有一个喷嘴（图中右侧的喷嘴），6～10t 箱式冲灰器有两个平行布置的喷嘴，括号内的尺寸用于6～10t 的箱式冲灰器。

### （四）布置设计

1. 设计要求

（1）制浆设备的布置要综合考虑受灰点、集中设备及灰浆泵（房）等综合条件而定。

（2）灰浆泵房尽量靠近制浆设备布置，中间的输送灰沟，布置上要求距离尽量短、直，以减少灰沟激流喷嘴的使用数量。

（3）当灰库下制浆时，尽量采用水力混合器或搅拌桶制浆；当电除尘器下制浆时，尽量采用搅拌桶或箱式冲灰器制浆。

2. 典型设备布置

（1）搅拌桶布置。某工程电除尘的灰斗下灰分两路，一路至仓泵，另一路至埋刮板输送机。每 3 个灰斗的一侧下灰由埋刮板输送机集中后进入搅拌桶加水制浆，通过灰渣沟接入灰渣泵房，再由灰渣泵输送至灰场。

搅拌桶布置见图 3-92。

（2）箱式冲灰器布置。某工程每台炉电除尘器共 32 个灰斗，每个电场 8 个灰斗。电除尘器每个灰斗下设一台输送器将飞灰输送至灰库。电除尘器一、二电场灰斗下还装设了电动锁气器和箱式冲灰器，在电除尘器下直接制灰浆，通过灰浆泵转运至灰渣泵房，再输送到灰场。

箱式冲灰器布置见图 3-93。

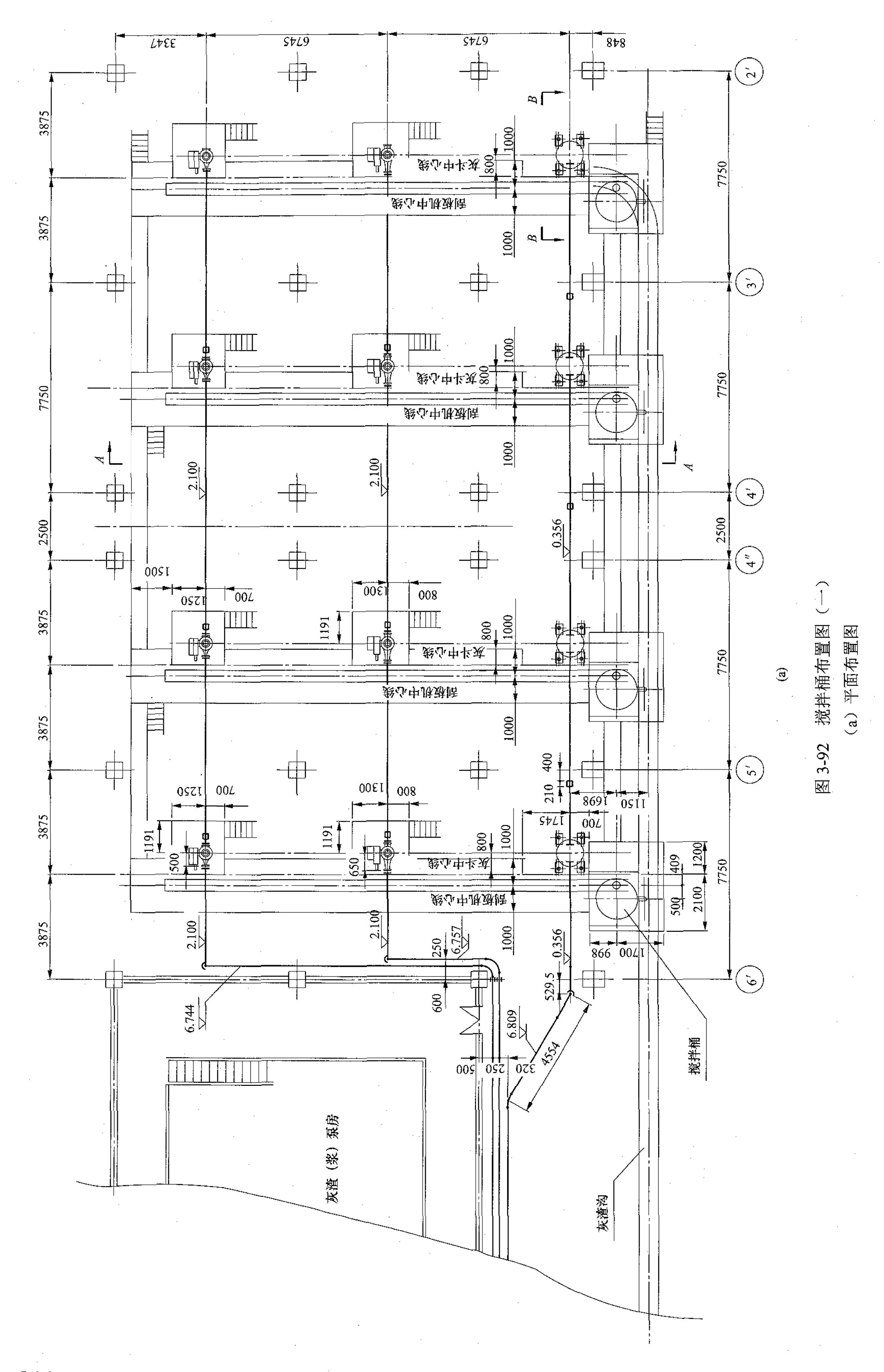
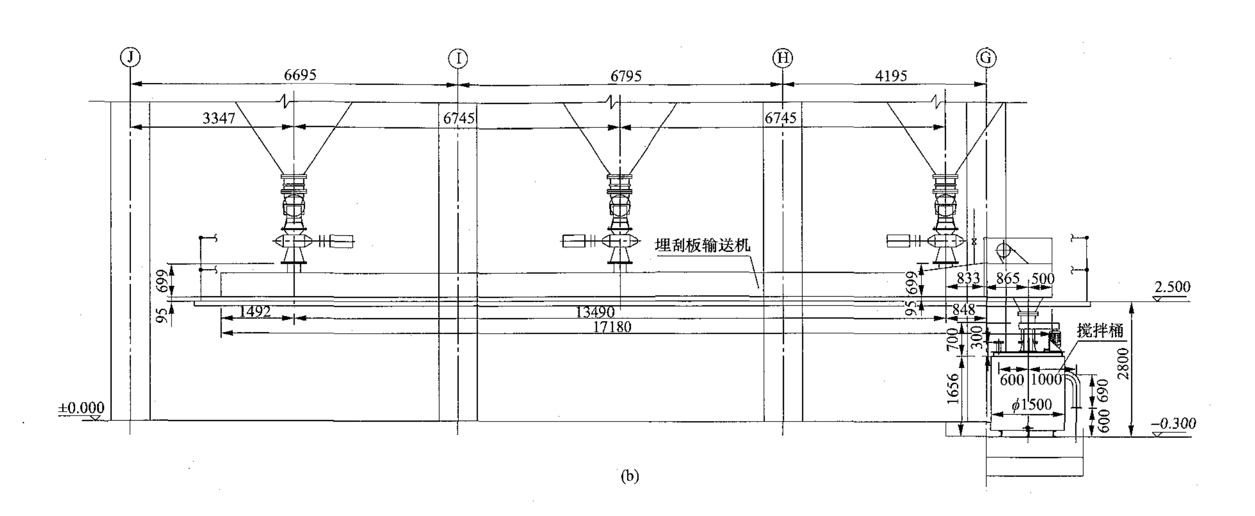
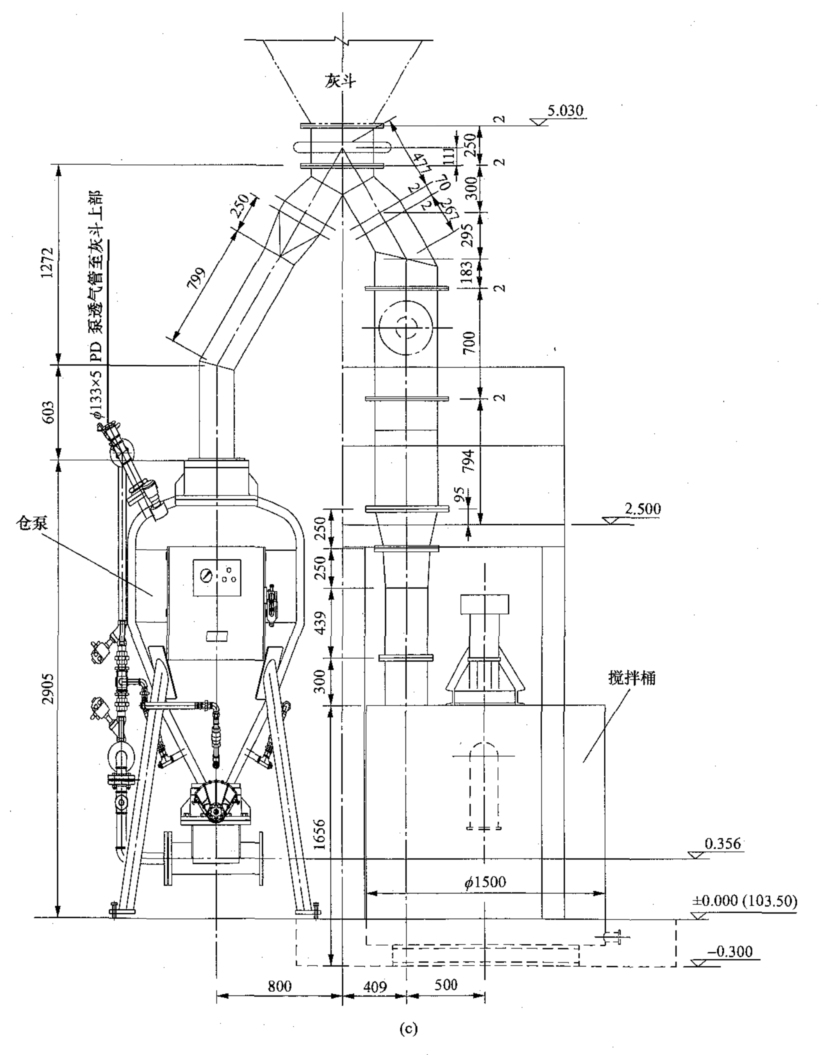



图 3-92 搅拌桶布置图（一）

（a）平面布置图




(b)




(c)

图 3-92 搅拌桶布置图（二）

（b）*A-A* 剖视图；（c）*B-B* 剖视图

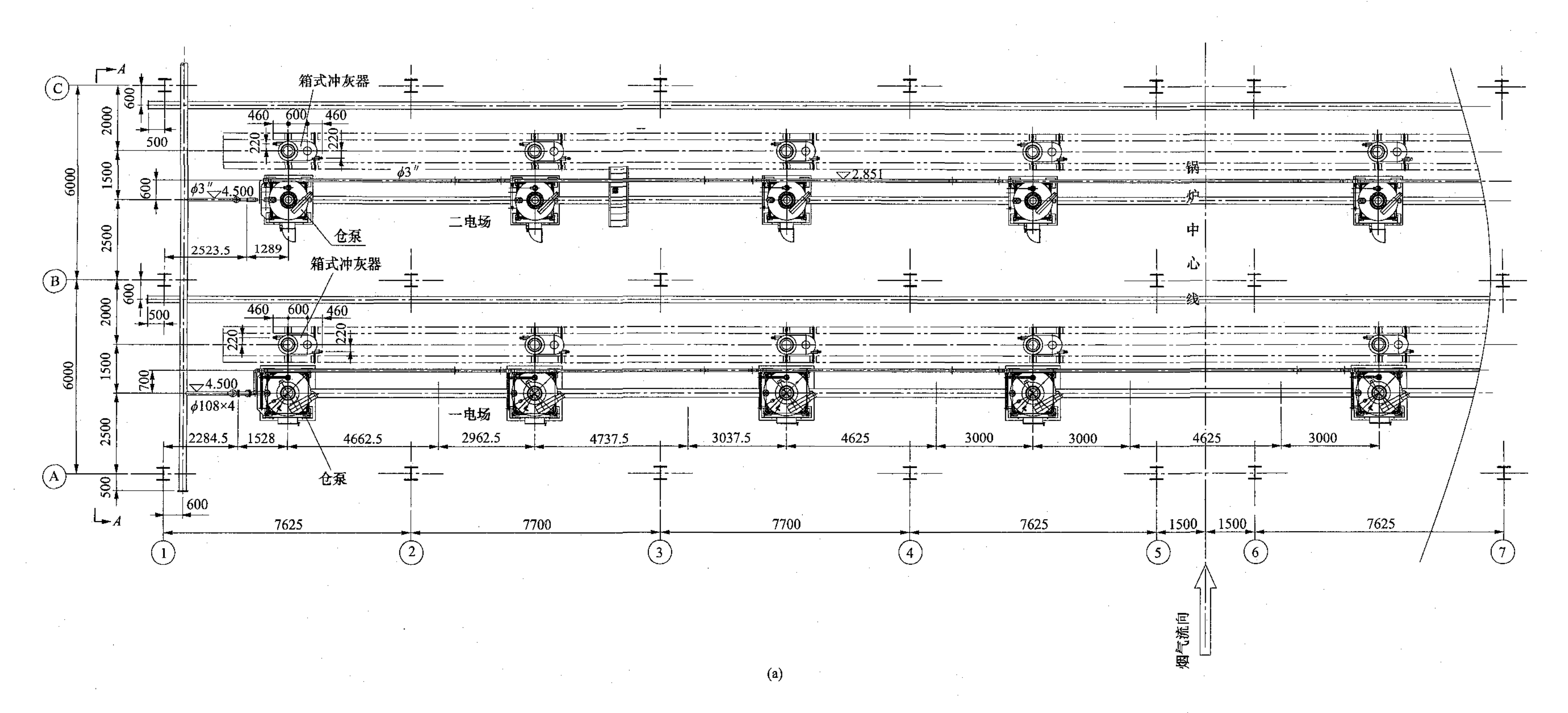
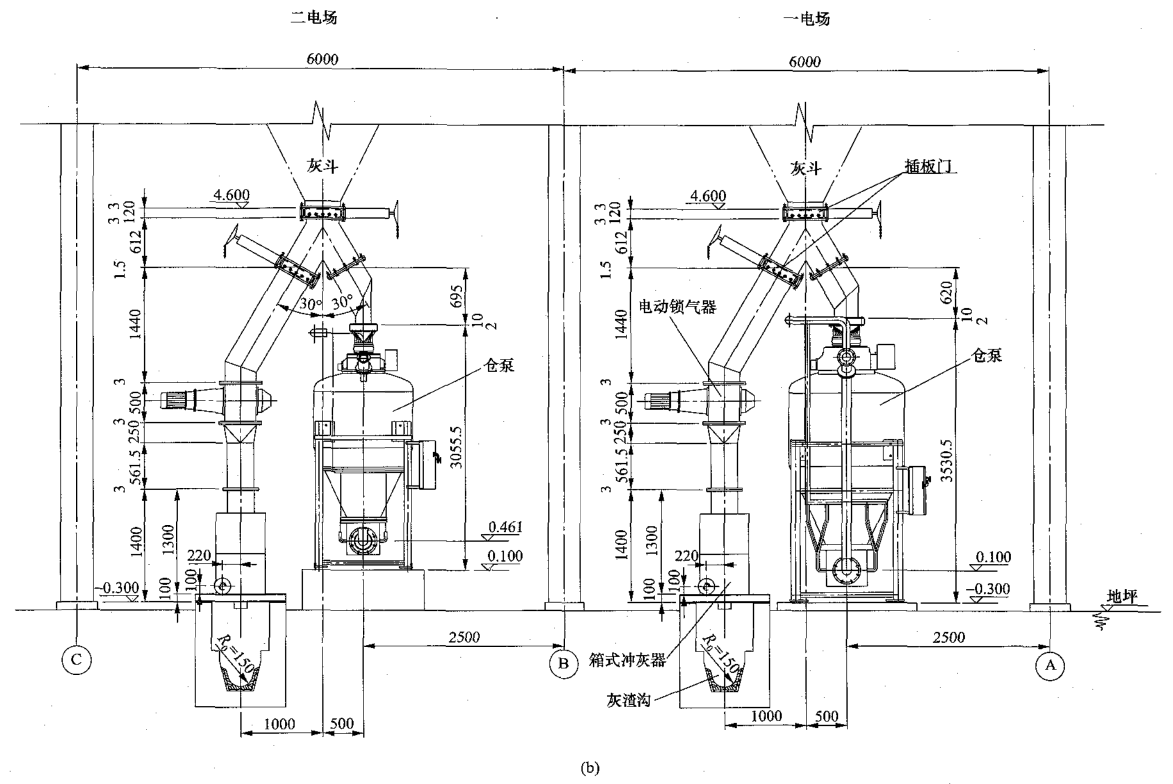



图 3-93　箱式冲灰器布置图（一）

（a）平面布置图




(b)

图3-93 箱式冲灰器布置图（二）

（b）*A-A* 剖视图

（3）水力混合器布置。某工程建设2×300MW机组。灰库有两个排灰口，其中一个排灰口设干灰制浆系统，将干灰制备成灰浆进入灰浆池，利用离心式灰浆泵输送至灰场。水力混合器布置见图3-94。

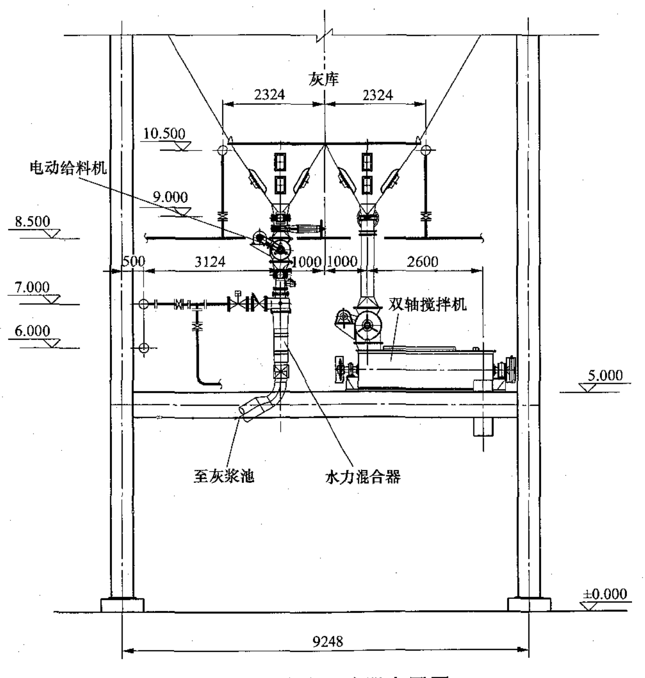



图3-94 水力混合器布置图

## 二、沉渣池系统

### (一)系统简介

当锅炉为液态排渣炉时，因液态渣硬度高、渣量大，对泵的磨损严重，不宜选用泵来输送，一般都采用灰渣分除的方式。此时，渣可以采用沉渣池系统。因此，沉渣池通常用于沉淀液态炉渣（或固态炉渣）。

液态炉渣（或固态炉渣）经排渣装置（如圆盘捞渣机）排入渣沟，由于渣沟坡度和激流喷嘴的动能沿渣沟自流进入沉渣池。经沉渣池沉淀后，炉渣由桥式抓斗起重机抓入汽车外运。沉清后的清水循环进入系统使用。

典型的沉渣池系统见图3-95。

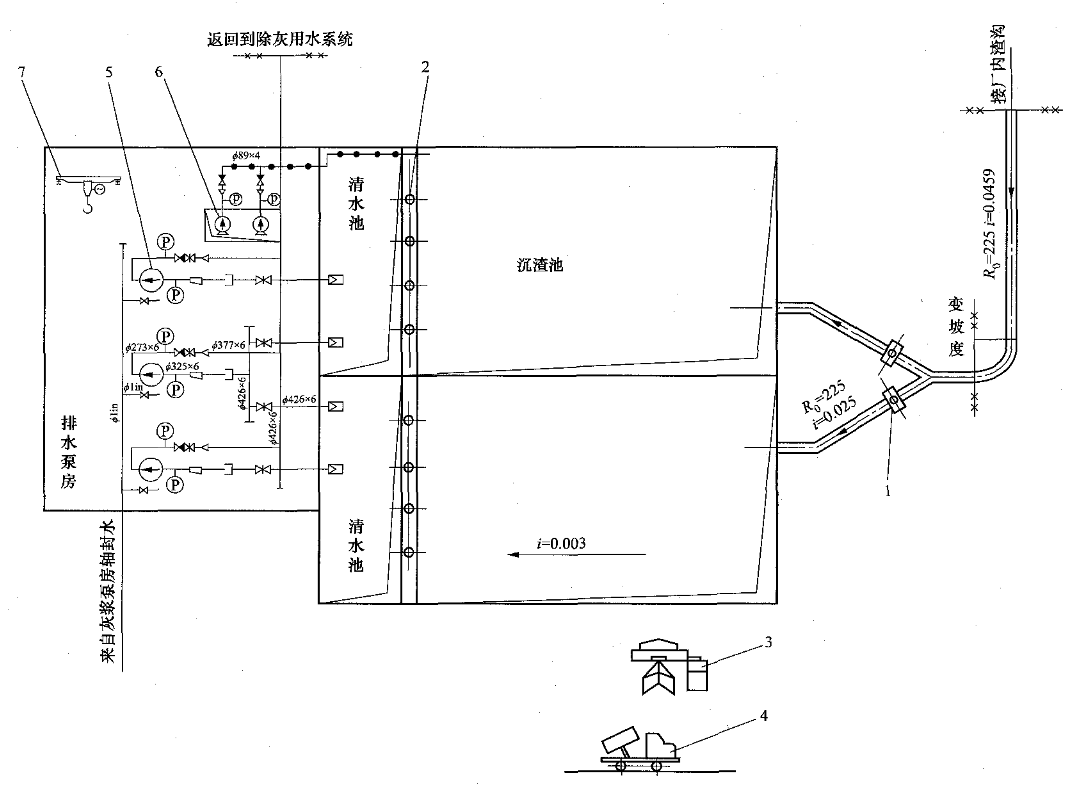



图3-95　典型的沉渣池系统

1—手动灰渣沟插板门；2—放水门；3—桥式抓斗起重机；4—输渣自卸汽车；5—排水泵；6—立式污水泵；7—电动单梁起重机

### (二)设计要求

（1）沉渣池的几何尺寸应根据渣浆量、渣的颗粒级配值、沉降速度及外部输送条件等因素确定。其有效总容积宜能储存不小于除渣系统24h的排渣量。

（2）沉渣池宜设2个，1个接收渣浆，1个排水、沉渣。当排水能错开运行或用于液态排渣时，可设1个。

（3）沉渣池旁宜设转运渣斗或堆放湿渣场地，转运渣斗有效容积或堆渣场地面积应根据厂外运输条件而定，但不宜小于系统12h的排渣量。转运渣斗下部的地坪或堆渣场地应有0.5%的坡度坡向沉渣池。

（4）沉渣池的清水池应设有能清除积渣的措施。清水池底部宜比沉渣池底部低200～300mm。

（5）沉渣池的排水，宜循环使用，其排水泵宜采用杂质泵。

### (三)设计计算

沉渣池的计算主要有容积法和流速法两种计算方法。对于渣粒大、结焦性强的炉渣，特别是液态炉渣和层燃炉渣，可采用容积法；对于渣质松散、与水混合后大部分裂化成粉状细粒的炉渣，可采用流速法。

1. 容积法

（1）确定每吨干渣在水中（沉渣池中）所占的容积。对于固态炉渣为1.1～1.2m³/t；对于液态炉渣为0.70～0.80m³/t。

（2）沉渣池主要尺寸的确定。沉渣池的示意图见图3-96。

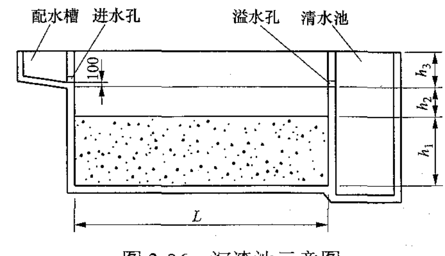



图 3-96　沉渣池示意图

1）沉渣池的有效设计容积 $V$

$$V=1.25v\,G \tag{3-74}$$

式中　$v$——每吨干渣在沉渣池中的容积，$m^3/t$；

$G$——沉渣池储渣周期内锅炉的排渣量，t，一般按系统 24h 的排渣量考虑；

1.25——考虑沉渣池的充满系数为 0.8 时的系数。

2）沉渣池的平均有效深度 $h_1$。此深度一般应大于或等于 2.5m。

3）确定沉渣池平面尺寸，即宽度 $b$ 和长度 $L$。此两尺寸与渣池周围环境、抓渣设备及有效深度 $h_1$ 等因素有关。宽度 $b$ 和长度 $L$ 有以下关系

$$b=\frac{V}{h_1 L} \tag{3-75}$$

当 $V$ 和 $h_1$ 已定时，则 $b$ 和 $L$ 互成比例关系，一般可根据抓斗起重机的类型或跨度，先定出 $b$ 的数值，然后求得 $L$ 值。在设计时应通过反复比较，最后才能确定 $h_1$、$b$、$L$ 这三个尺寸。

4）确定沉渣池的总深度 $H$

$$H=h_1+h_2+h_3 \tag{3-76}$$

式中　$h_1$——沉渣池的平均有效深度，m，一般应大于或等于 2.5m；

$h_2$——清水层深度，m，一般为 0.5m；

$h_3$——保护层深度，m，当渣水混合物以管道排入沉渣池时，可取 0.3m。

当混合物从渣沟（或配水槽）排入时，此尺寸即为渣沟入口底部（或配水槽底部）至池顶之间的距离。

（3）排水设施。一般在沉渣池的尾部设置清水池。还应考虑抓斗可进入清水池进行清淤。沉渣池的溢流孔宜做成一长条，其下部标高宜比进口下部标高降低 100mm（见图 3-96）。

2. 流速法

平流式沉砂池的工作原理：根据 $Q=vA$，通过加大入流的横截面积 $A$，使得入流在平流池中的速度骤降。又根据浅池理论，在池深、池子长度一定的情况下，入流的速度越小，水中的颗粒沉入池底从而被去除的几率就越大。因此，当渣水流过时，由于过水断面增大，水流速度下降，渣水中夹带的渣颗粒在重力的作用下下沉，从而达到分离水中渣颗粒的目的。

该计算方法的沉渣池示意图见图 3-96。

（1）沉渣池的有效设计容积 $V$

$$V=1.25\rho G\eta \tag{3-77}$$

式中　$\eta$——对应某一粒径的沉淀效率，%，对于粒径 $d$=0.032mm 的灰粒，取 $\eta$=99%。

其他符号意义同式（3-74）。

（2）确定水平流速 $v_{sp}$。对于粒径 $d$=0.032mm 的灰粒，由试验得到 $v_{sp}$=0.009m/s。计算时可取 $v_{sp}$=0.009m/s。

（3）沉渣池的断面面积 $A$

$$A=\frac{G_{zs}}{3600v_{sp}} \tag{3-78}$$

式中　$G_{zs}$——进入沉渣池渣水混合物流量，$m^3/h$，按式（3-23）计算；

$v_{sp}$——水平流速。

（4）确定沉渣池宽度 $b$。与“容积法”一样，根据地形及抓斗起重机的类型、跨度来定。

（5）沉渣池的水深 $h_2$

$$h_2=\frac{A}{b} \tag{3-79}$$

（6）沉渣池垂直向上悬浮速度 $v_{ch}$

$$v_{ch}=4\varepsilon\frac{v_{sp}}{h_2^{0.2}} \tag{3-80}$$

式中　$\varepsilon$——池壁表面粗糙度系数，见表 3-36。

**表 3-36　　池壁表面粗糙度系数**

| 壁面性质 | 壁面状况 | |
|---|---|---|
| | 普　通 | 良　好 |
| 涂水泥砂浆的砖砌体 | 0.015 | 0.013 |
| 水泥砂浆砌的普通块石砌体 | 0.025 | 0.02 |
| 纯水泥壁面 | 0.012 | 0.011 |
| 水泥砂浆饰面 | 0.013 | 0.012 |
| 干砌块石砌体 | 0.033 | 0.03 |

（7）沉渣池长度 $L$

$$L=\frac{v_{sp}h_2}{v_0-v_{ch}} \tag{3-81}$$

式中　$v_0$——渣粒的水力沉速，m/s，当无资料时，可参考下列原则选取：当固液比为 1:10 时，取 $0.54\times10^{-3}$；当固液比为 1:18 时，取 $0.608\times10^{-3}$；当固液比为 1:20 时，取 $0.99\times10^{-3}$。

（8）沉渣池的平均有效深度（即积灰高度）$h_1$

$$h_1=\frac{V}{Lb} \tag{3-82}$$

（9）确定保护层深度 $h_3$。其方法与“容积法”相同，一般取 0.3m。

（10）沉渣池总深度 $H$。同式（3-76），即 $H=h_1+h_2+h_3$（m）。

（四）布置设计

1. 设计要求

（1）当采用渣沟自流方式将渣排入沉渣池时，沉渣池的位置应尽可能靠近锅炉房。

（2）沉渣池应根据气象条件，采用露天或半露天布置，在严寒地区可采用室内布置，并应考虑室内通风、排放水蒸气的措施。

（3）沉渣池应设抓斗起重机。在布置抓斗起重机时，抓斗的运行高度应低于极限高度1m，抓斗的下缘与受渣装置的距离应大于1m，渣斗宜考虑泄水措施。

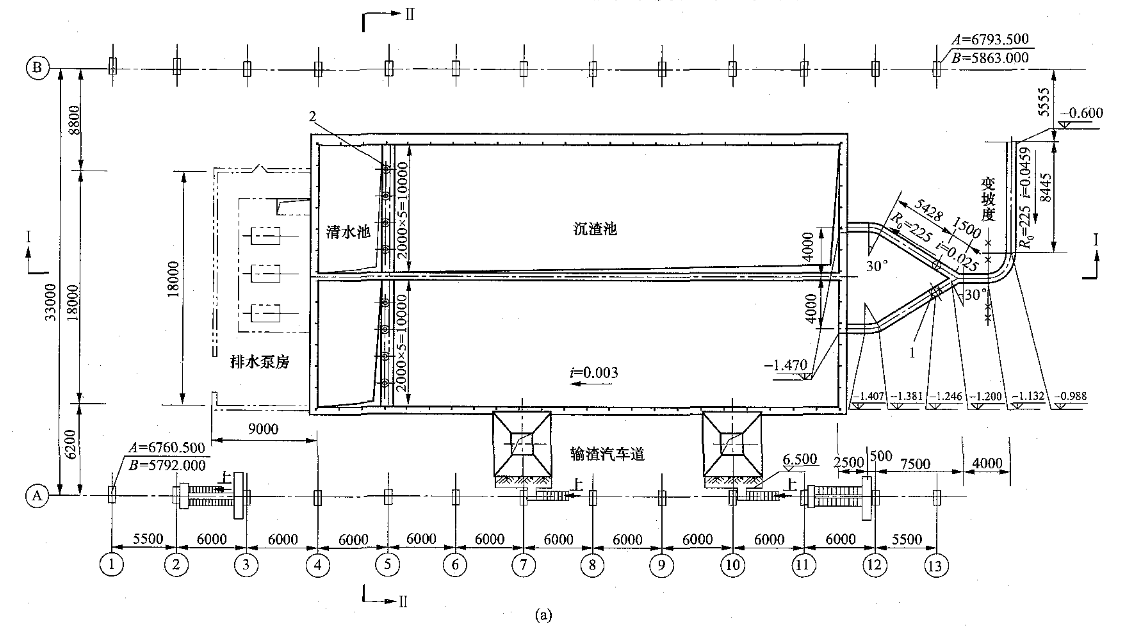
（4）抓斗起重机的安装设计应满足制造厂的要求。抓斗起重机大车轨道两端应考虑安全尺寸和设置阻进器，安全尺寸应大于终点开关动作后抓斗起重机大车的滑移距离，并不宜小于1m。

2. 典型布置

某工程2×200MW机组，锅炉为液态排渣炉。除灰渣系统采用灰、渣分除的水力除灰系统。炉渣经圆盘捞渣机捞出后进入渣沟，在激流喷嘴的作用下沿渣沟自流至沉渣池。渣经沉渣池沉淀后，由电动桥式抓斗起重机抓入装渣斗装车，最终运送至灰场贮存。

沉渣池的澄清水由排水泵送回除灰渣系统使用。2台炉共设2台排水泵，其中1台运行，1台备用。由于沉渣池澄清水含有部分杂质，水质较差，故排水泵选用耐磨杂质泵，以提高使用寿命。

该工程沉渣池系统图参见图3-95，布置见图3-97。排水泵房的布置见图3-98。



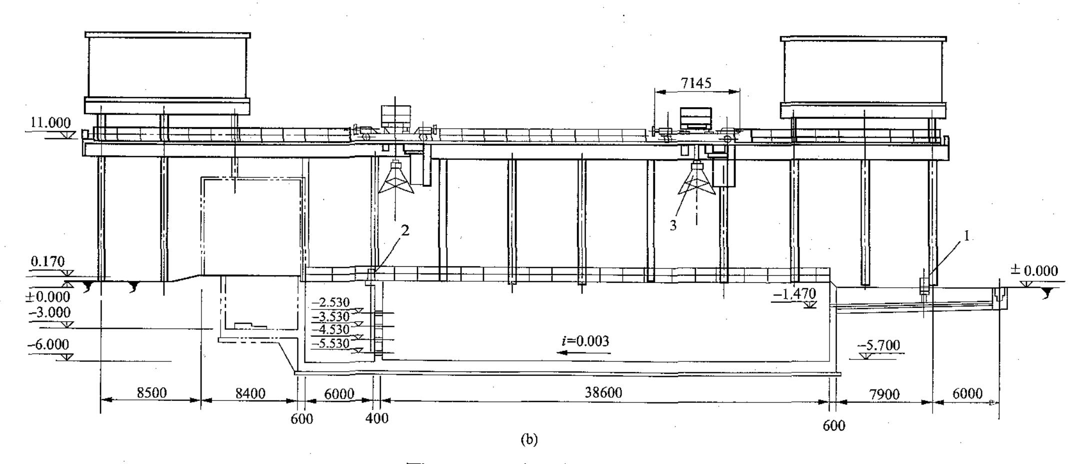
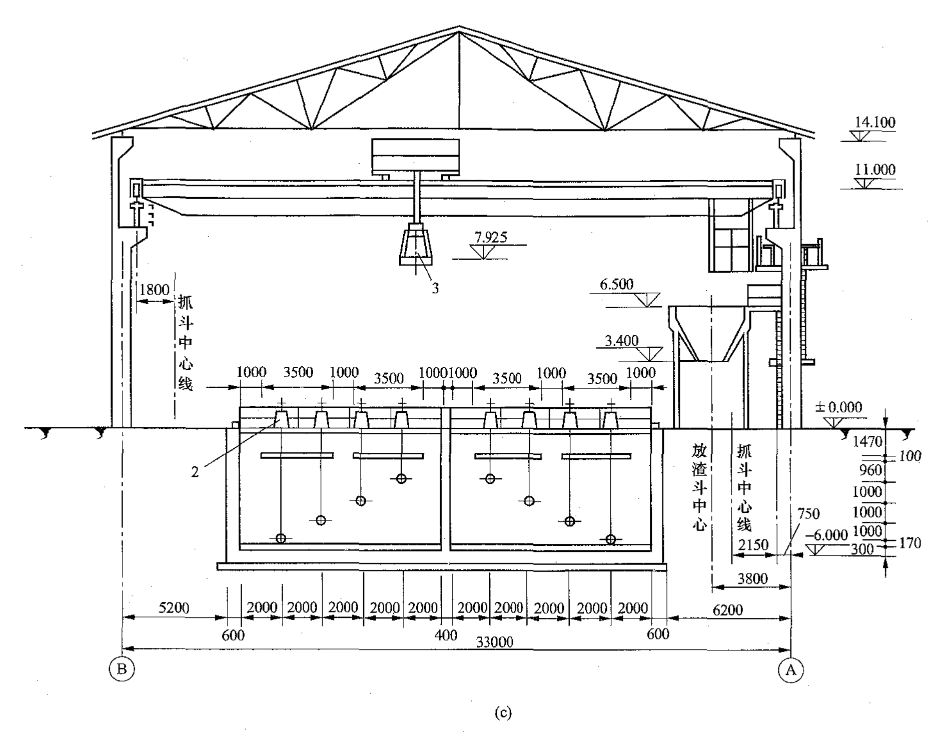




图3-97 沉渣池布置图（一）

（a）平面布置图；（b）I-I剖视图

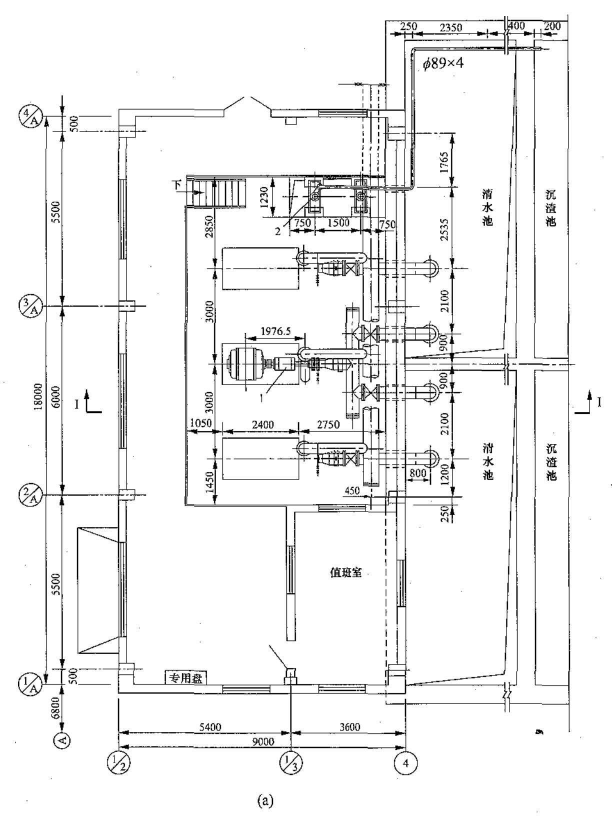



(c)

图 3-97 沉渣池布置图（二）

（c）II-II 剖视图

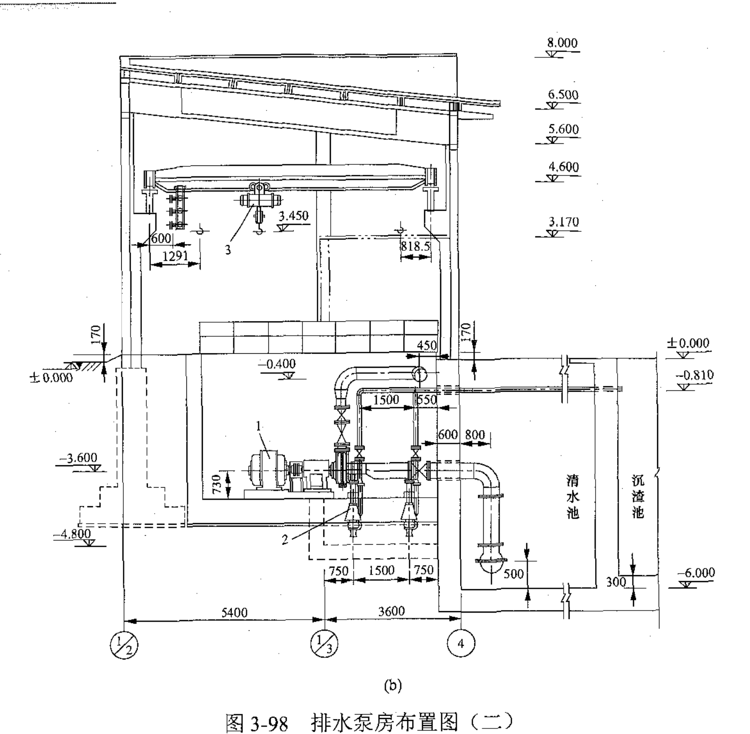
1—手动灰渣沟插板门；2—放水门；3—桥式抓斗起重机




(a)

图 3-98 排水泵房布置图（一）

（a）平面布置图




(b)

图 3-98 排水泵房布置图（二）

（b）I-I 剖视图

1—排水泵；2—立式污水泵；3—电动单梁起重机

第四章

# 机械输送系统

## 第一节　系　统　简　介

输送机械是以连续、均匀、稳定的输送方式，沿着一定的线路输送散状物料的装置，是物料搬运机械的一种主要类别。除灰渣机械输送系统是火力发电厂除灰系统之一，分为厂内机械输送系统和厂外机械输送系统，厂内机械输送系统的设计范围是从锅炉、除尘器、磨煤机等上游设备物料排出口到贮仓入口，厂外机械输送系统的设计范围是从贮仓卸料设备出口到厂外机械输送设备出口。

### 一、厂内机械输送系统

厂内机械输送系统按输送物料种类，一般可分为机械除渣系统、机械除灰系统、机械除石子煤系统。

1. 机械除渣系统

系统功能是将高温炉渣冷却后，输送到渣仓。煤粉炉机械除渣系统分为湿式机械除渣系统和干式机械除渣系统。湿式机械除渣系统工艺流程如图 4-1 所示，宜采用刮板捞渣机直接除渣到渣仓的系统，当布置困难时，在刮板捞渣机出口可接二级刮板捞渣机输送到渣仓。干式机械除渣系统工艺流程如图 4-2 所示，根据工程的布置条件，可采用单机或多级的输送系统，冷渣设备采用风冷式排渣机，常用的输送设备有螺旋输送机、埋刮板输送机、链斗式输送机、斗式提升机和带式输送机等。流化床锅炉机械除渣系统冷渣设备通常采用滚筒式冷渣器，输送设备通常采用埋刮板输送机、链斗式输送机、斗式提升机等。流化床锅炉机械除渣系统工艺流程如图 4-3 所示。

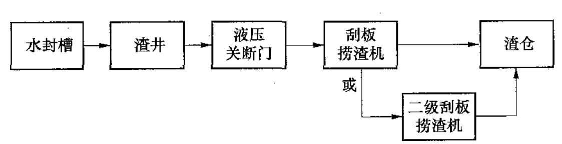



图 4-1　湿式机械除渣系统工艺流程图

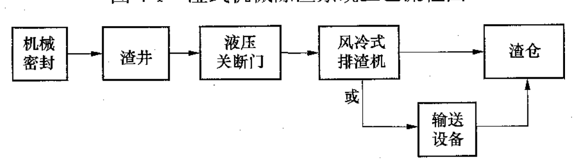



图 4-2　干式机械除渣系统工艺流程图

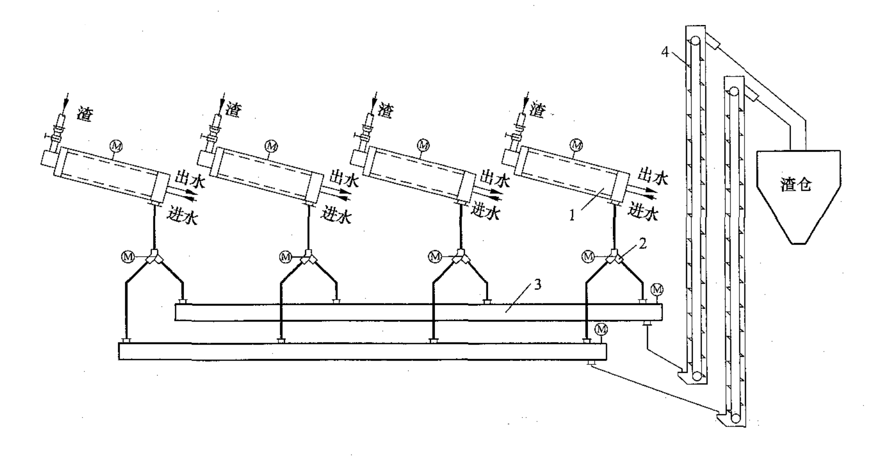



图 4-3　流化床锅炉机械除渣系统工艺流程图
1—冷渣器；2—电动三通；3—埋刮板输送机（或链斗输送机）；4—斗式提升机

2. 机械除灰系统

除尘器灰斗的排灰采用机械设备集中，再用气力输送系统、水力输送系统输送或装车外运。常用的机械输灰设备有埋刮板输送机、螺旋输送机、斗式提升机等。

3. 机械除石子煤系统

中速磨煤机排出的石子煤采用机械设备输送到石子煤仓或通过转运设备装车外运。常用的机械输送石子煤设备有埋刮板输送机、振动输送机、斗式提升机、带式输送机和电瓶叉车等。机械除石子煤系统如图4-4、图4-5所示。

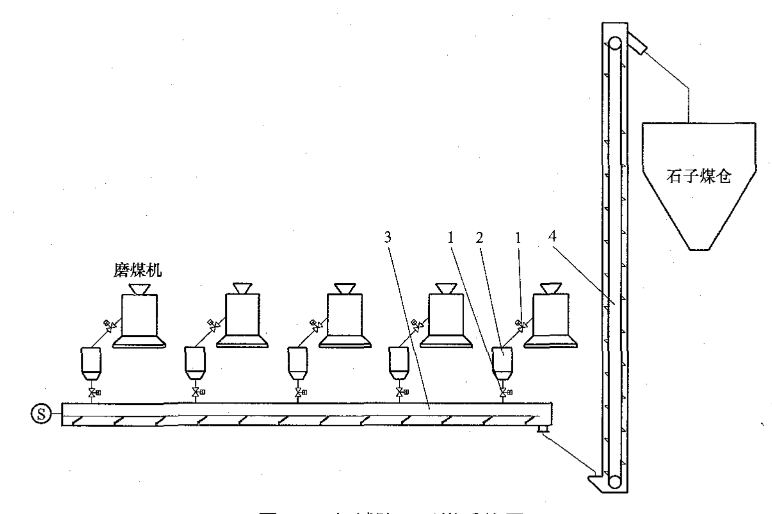



图4-4 机械除石子煤系统图

1—气动闸阀；2—石子煤斗；3—振动输送机；4—斗式提升机（或带式输送机）

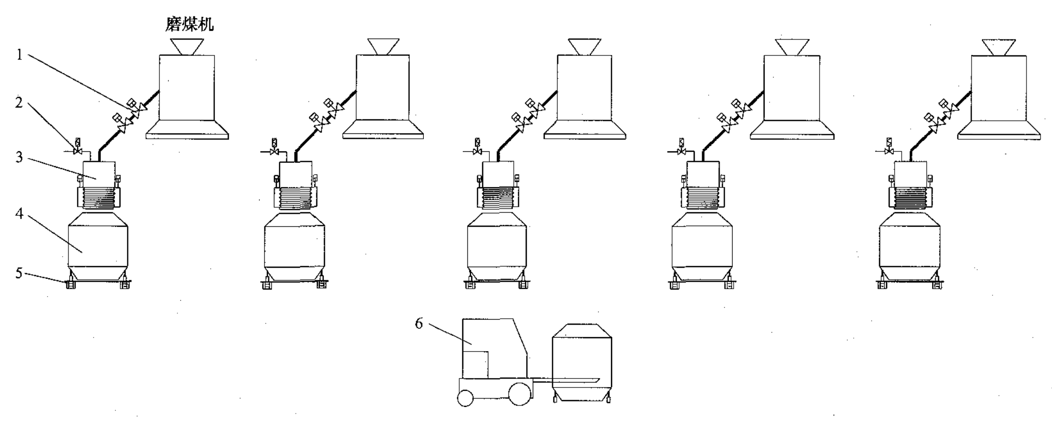



图4-5 石子煤简易输送系统图

1—气动闸阀；2—缓冲斗；3—电磁泄压阀；4—密封装置；5—活动石子煤斗；6—叉车

## 二、厂外机械输送系统

厂内仓储的灰渣等物料采用厂外机械输送系统或转运设备运送到灰场或用户，主要设备有带式输送机、汽车和船舶。

## 三、设计原则

（1）刮板捞渣机湿式除渣系统、风冷式排渣机干式除渣系统应结合工程具体情况，综合考虑燃煤特性、灰渣量大小及其变化、运行安全可靠性、灰渣综合利用、水资源、气象等条件和因素来选用。

（2）进入炉膛的干渣冷却风量不超过锅炉燃烧总空气量的1%时，理论上对锅炉效率和排烟温度影响不大。当排渣量较大，冷却风量超过锅炉燃烧总空气量的1%时，不宜采用风冷式机械除渣系统。

（3）当电厂燃煤灰渣存在严重结渣倾向、锅炉排渣量较大（超过20t/h）或灰渣量变化较大（超过2.5倍）时，宜采用刮板捞渣机湿式除渣系统，不推荐采用风冷式机械除渣系统。

（4）石子煤机械输送系统出力宜满足在1h内输送锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤种8h的石子煤量的要求。

## 第二节 厂内机械设备

### 一、刮板捞渣机

刮板捞渣机是火力发电厂煤粉锅炉的连续除渣设备，锅炉排出的热渣落到装满水的刮板捞渣机槽体中，热渣经冷却、粒化后输送至渣仓或其他储运设备。刮板捞渣机主要安装在炉膛排渣口下，刮板捞渣机上层槽体充满冷却水，炉渣依靠重力作用经过渣井自然落入刮板捞渣机上层水槽中，渣被冷却粒化，然后随输送刮板向刮板捞渣机头部方向上层槽体的倾斜脱水段移动，大部分水经此段后又流回水槽中。刮板捞渣机链条沿着下槽体再返回上槽体中。而含少量水的灰渣，从刮板捞渣机头部排出，可以直接进入渣仓或经过输送机输送至渣仓，然后装车外运。从刮板捞渣机头部排出的渣，也可以经碎渣机破碎后进入水力除渣系统。

刮板捞渣机与锅炉炉膛之间大多采用水密封结构，确保炉膛与大气隔绝，防止空气漏入，并能满足锅炉各方位的自由膨胀。

（一）设计要求

（1）刮板捞渣机宜每台炉配置一台，应采用连续除渣方式。

（2）刮板捞渣机设计出力不宜小于锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤质时排渣量的400%。

（3）刮板捞渣机应满足停机后上槽体积满渣时仍能带负荷启动的要求。

（4）刮板捞渣机头部仰角宜控制在30°左右，最大不宜超过35°。

（5）刮板捞渣机的输送速度宜根据锅炉排渣量进行调节，其输送速度最大不宜超过4m/min。一般刮板捞渣机运行速度正常情况为0.5～2.5m/min，最大不宜超过4m/min。

（6）刮板捞渣机与渣接触的部件应采用耐磨、耐腐蚀材料。链条应采用专用高耐磨链条。

（7）锅炉水封插板插入渣斗水封槽和关断门插入刮板捞渣机水槽体内的水封高度，或锅炉水封插板直接插入捞渣机水槽体内的水封高度，都应与锅炉的炉膛压力保护值相适应。

（8）单台刮板捞渣机最大出力不宜超过100t/h，长度不宜超过90m。

（9）刮板捞渣机的抗冲击能力应按照严重冲击和骤变荷载设计（结焦型煤种）。

（10）刮板捞渣机应设有机械-电气双级过载保护装置，即过载保护、断链保护、脱链保护、机械故障报警、排水温度高报警、水位低报警、液压站系统故障报警等远传声光信号。

（11）刮板捞渣机周边应装设固定的防护栏杆，挂“当心烫伤”警示牌。

（二）设计计算

1. 设备出力计算

刮板捞渣机出力取决于刮板运行速度、刮板有效宽度、刮板高度及炉渣的特性，可按式（4-1）进行计算

$$G = 60bhv\rho\psi \tag{4-1}$$

$$\psi = 1 - L\tan(\alpha - \theta)/2h \tag{4-2}$$

式中 $G$——刮板捞渣机出力，t/h；

$b$——刮板有效宽度，m；

$h$——刮板高度，m；

$v$——刮板运行速度，m/min；

$\rho$——物料堆积密度，t/m$^3$，固态排渣炉可取0.9～1.1t/m$^3$；

$\psi$——充满系数；

$L$——刮板间距，m；

$\alpha$——刮板捞渣机倾斜段仰角，(°)；

$\theta$——物料安息角，(°)，湿渣取30°。

2. 电动机功率的计算

刮板捞渣机电动机功率可按式（4-3）计算

$$P = kFv/\eta \tag{4-3}$$

$$F = 1.1[(Lmf_1 + Lm_1 f_2) + L_1 m_1(0.7\cos\alpha + \sin\alpha)]/n \times 100 \tag{4-4}$$

式中 $k$——电动机功率备用系数，$k=1.1$～1.2；

$v$——刮板链条速度，m/s；

$\eta$——传动效率，一般可取0.75～0.9；

$F$——链轮总牵引力，kN；

$L$——刮板捞渣机全长，m；

$L_1$——刮板捞渣机斜坡长度，m；

$m$——刮板、链条及连接件的单位质量，kg/m；

$m_1$——刮板捞渣机单位长度输送物料质量，kg/m；

$f_1$——钢对钢的摩擦系数；

$f_2$——灰渣与槽底的摩擦系数；

$n$——链条根数。

（三）设备选型

1. 结构形式

刮板捞渣机由上层槽体、下层槽体、驱动装置、链条、刮板、传动链轮、改向链轮、张紧机构及电动移动装置等组成。刮板捞渣机结构图见图4-6。

（1）槽体、回程链形式。刮板捞渣机槽体应采用加强结构设计，结构为整体箱形封闭式，上、下槽体均为碳钢钢板制作，整体设计为焊接结构。水平段上、下槽体应采用厚度不小于12mm的碳钢板焊制而成，外侧采用工字钢做肋加固；槽体为倒钟形、开阔式、防飞溅槽体，可引导冲溅飞起的冷却水向内侧流动，

防止塌焦产生的过热灰水溅出刮板捞渣机槽外而造成人身伤害事故；槽内铺防脱落、防破碎铸石衬或耐磨钢板以承载焦块的冲击。

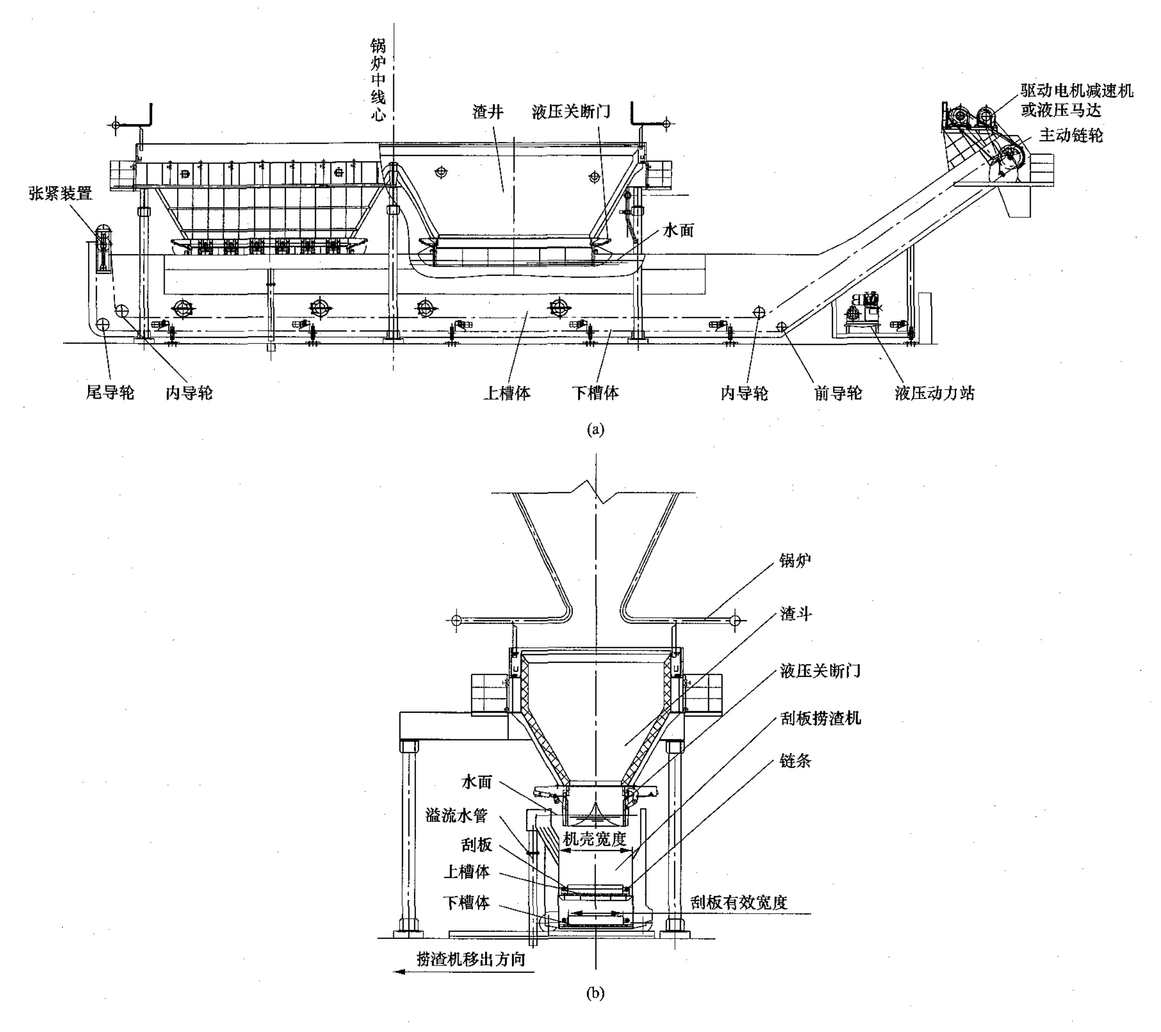



图 4-6　刮板捞渣机结构图

（a）纵断面布置图；（b）横断面布置图

下槽体宜全封闭，并设有检查维修孔，应能满足对全程回程链条和刮板进行监视、检查和维修。对于刮板捞渣机水平段底部全程设有渣沟或排水沟的工程，水平段下槽体可采用敞开式，链条回程带渣可直接落入渣沟或排水沟。

刮板捞渣机槽体水深应保证能使渣块充分粒化，满足炉膛的密封要求，同时具有防爆、防溅、强粒化、能承受大焦块冲击的功能。对于 300MW 以下机组，槽体水深不应小于 1.6m，对于 300MW 及以上机组，槽体水深不应小于 1.8m。上槽体应设有一个自动补水系统，以保证水温不大于 60℃（当采用维持水位运行方式时，槽体容积要适当加大，上槽体水温不宜大于 70℃），并提供水温显示和超温报警。

刮板捞渣机上、下槽体及斜升段底板采用玄武岩铸石衬板或耐磨钢板，玄武岩铸石衬板硬度不小于 HRC32，耐磨钢板硬度不小于 HB360。刮板捞渣机上槽体底部侧边加设防磨复合衬板。

刮板捞渣机的回程链在上侧的称上回链式，回程链在下侧的称下回链式。槽体分为双槽体和单槽体，对应上回链式采用单槽体，对应下回链式采用双槽体。

上回链式制造与维修较容易，在同样高度下可取得较大的槽体水深与容量，尾端张紧调节链轮可不必高出水面，无需防回程刮板带渣措施。但对炉膛强结焦情况下的除渣适应性差，巨大坚硬的渣块会撞击上回链，有时会卡死运行的刮板。

下回链式机身结构较复杂，在同样高度下比上回链式的槽体水浅和容量小。

考虑渣块从刮板捞渣机上方炉膛直接落入，以及对炉膛结焦的适应性等，为避免落渣影响链条运行，刮板捞渣机绝大多数采用双槽体下回链形式。

（2）传动链轮。刮板捞渣机传动链轮链齿采用精锻工艺制造，经硬化处理，使之具有高的强度及耐磨性，有较高的使用寿命，可选用凸齿链轮和凹齿链轮两种类型，传动链轮结构形式见图 4-7。

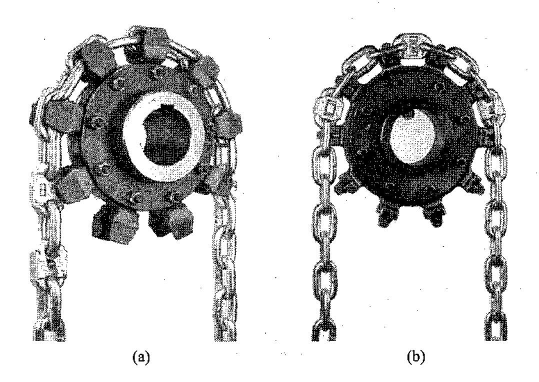


图 4-7 传动链轮结构形式

（a）凹齿链轮图；（b）凸齿链轮图

凹齿链轮对链条、链轮的精度要求较低，不易掉链，但传动定位精度低，易夹渣夹链，链条磨损大。目前国产刮板捞渣机 70%以上采用凹齿链轮。

凸齿链轮对链条、链轮的精度要求高，链条、链轮磨损易出现链条从链齿脱落，在目前国内技术状况下，凹齿链轮传动在链条磨损量及磨损均匀性方面不如凸齿链轮好。凸齿具有链条磨损小、技术先进、节省能耗等优势。国外引进技术或进口刮板捞渣机普遍采用凸齿链轮作为主驱动链轮。

（3）改向链轮。改向链轮为内导轮、前导轮和尾导轮的总称。刮板捞渣机内导轮安装在捞渣机槽体内，运行在灰水中，为传动链条改向用，由于其长期浸于灰水中，运行环境恶劣，是刮板捞渣机薄弱环节之一。内导轮采用合金耐磨材料，其轴承一般采用进口轴承。

前导轮和尾导轮分别位于刮板捞渣机水平段下槽体的前端和尾端，运行环境相对较好。

（4）链条形式。刮板捞渣机的传动链形式有模锻链、板链和环链等多种，但应用最普遍（包括中、小型刮板捞渣机）的是高强度、高耐磨圆环链。圆环链与接链环应具有相同机械性能指标，有条件时应尽可能采用同一制造单位的配套产品。链条直径规格根据输送距离、出力确定，可分别选用直径为 22～38mm 的高强度、高耐磨圆环链。链条、接链环表面需硬化处理，硬化层厚度不小于 2mm，其表面硬度不小于 HRC60。

（5）刮板。刮板根据形状的不同，可分为三角形截面刮板、矩形截面刮板和五边形截面刮板，五边形截面刮板既具有传统的三角形截面刮板的刚性足、承载力大、不易变形的优点，又具有矩形截面刮板的耐磨性能、重复修复工艺性能好的优点；同时，五边形截面刮板密封空腔大，在渣水中浮力增大，摩擦阻力小。刮板易磨损边应镶焊耐磨边条或全部采用耐磨合金。刮板截面形式见图 4-8。

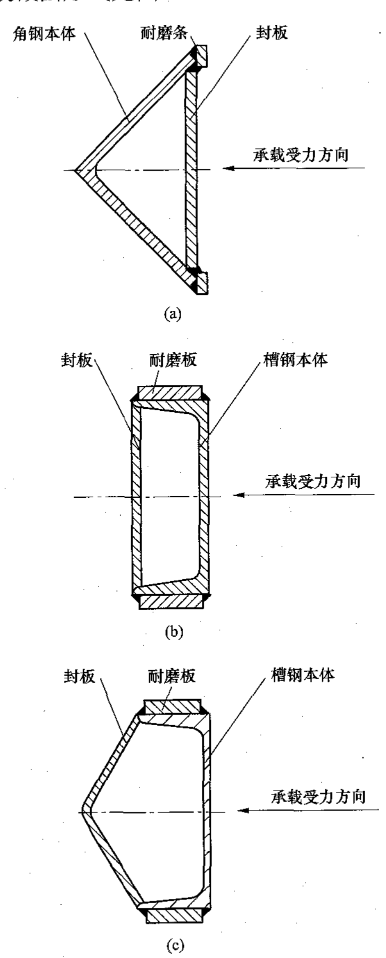



图 4-8 刮板截面形式

（a）三角形截面刮板；（b）矩形截面刮板；

（c）五边形截面刮板

（6）张紧装置。刮板捞渣机多数采用液压自动张紧装置，张紧装置工作链与回程链为滑动运行结构，能保持张紧力恒定，并及时吸收刮板捞渣机拖动链条磨损后的增长量，保证链条、刮板全程张紧，使刮板捞渣机运行平稳，可降低刮板与底板的摩擦阻力，提高了链条刮板的使用寿命。张紧装置可降低刮板与底板的摩擦阻力，防止刮板捞渣机掉链、卡链，辅助脱链，张紧装置应设置单向逆止装置，防止张紧滑块因刮板捞渣机负荷加大而回落，确保张紧可靠工作。

（7）驱动装置。刮板捞渣机采用液压马达驱动或

电动机减速机驱动两种方式，中、小型刮板捞渣机以电动机减速机驱动为主，大型刮板捞渣机主要以液压马达驱动为主。

对于 600MW 以上机组，多采用液压马达驱动变量泵调节，其具有动力强劲、运行平稳、过载保护性能可靠、安装空间小等优点，但价格较高、维护检修工作量大。对于 600MW 以下机组，可采用电动机减速机驱动。电动机减速机驱动、变频器调速的驱动形式，价格低、故障率低、维护检修简便。液压马达驱动图见图 4-9，电动机减速机驱动图见图 4-10。

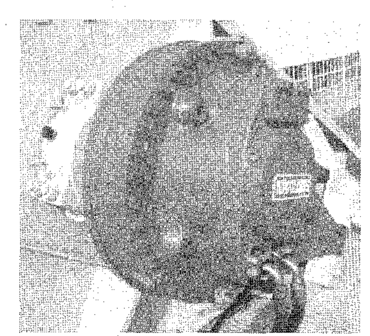


图 4-9　液压马达驱动图

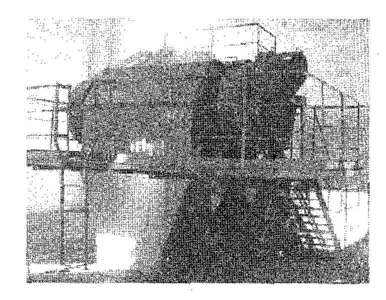


图 4-10　电动机减速机驱动图

2. 主要技术参数

常用刮板捞渣机的主要技术参数见表 4-1，供设计时参考。在工程应用中，还需根据锅炉炉型、容量、煤质特性、排渣量等因素合理选择设备。

**表 4-1　常用刮板捞渣机的主要技术参数**

| 技术参数 | 单位 | 600～1000MW 机组 | 300MW 机组 | <300MW 机组 |
|---|---|---|---|---|
| 每台炉所配台数 | 台 | 1 | 1 | 1 |
| 正常出力（以干渣计） | t/h | 15 | 10 | 2～5 |
| 最大出力（以干渣计） | t/h | 60 | 40 | 15 |
| 正常出力时刮板运行速度 | m/min | 1.5 | 1.0 | 0.5 |
| 最大出力时刮板运行速度 | m/min | 4.0 | 3.0 | 1.5 |
| 驱动电动机功率 | kW | 22～55 | 11～30 | 3～11 |
| 刮板宽度 | mm | 1810/2310 | 1450 | 1450 |
| 刮板高度 | mm | 228 | 228 | 208 |
| 刮板间距 | mm | 1008 | 1008/1080 | 1080/920/860 |
| 倾斜段仰角 | （°） | ≤35 | ≤35 | ≤35 |
| 机体上槽体水深 | mm | 2000～2500 | 1500～1800 | 800～1500 |
| 水平段宽度 | mm | 2000（最小内宽） | 1632（最小内宽） | 1560（最小内宽） |
| 驱动形式 | | 液压马达驱动 | 液压马达驱动或电动机减速机驱动 | 液压马达驱动或电动机减速机驱动 |
| 链条规格 | mm | 34×126/36×126 | 34×126/30×108 | 30×126/26×92/22×86 |

注　刮板捞渣机目前投运的最长总长度（刮板捞渣机水平段长度与斜升段长度之和）为 75m。

### （四）刮板捞渣机附属设备

1. 渣斗、水封槽

当设置渣斗时，渣斗的有效容积不宜小于储存锅炉最大连续蒸发量工况时 4h 的排渣量。渣斗上部的水封插板与锅炉下联箱所焊连接板用螺栓连接，水封插板插在水封槽中，以吸收炉膛受热面的膨胀并保证锅炉的密封，水封高度满足炉膛压力保护值要求。刮板捞渣机水封的方式有内溢流型和无溢流型两种，目前大多数刮板捞渣机采用内溢流型。水封槽的工作原理图见图 4-11。

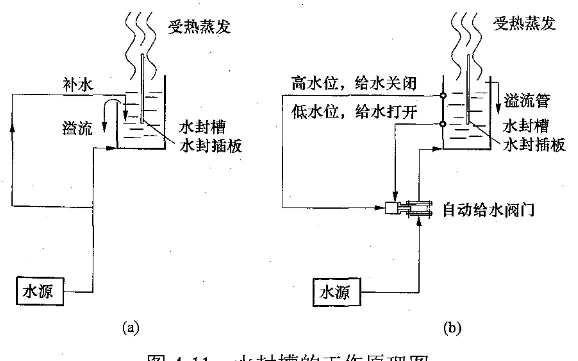



图 4-11　水封槽的工作原理图
（a）内溢流型；（b）无溢流型

渣斗内衬耐磨、耐火隔热层。渣斗角度应不小于45°，渣斗及其平台应采用钢支架支撑。渣斗应有足够的结构强度和刚度，以承受落渣冲击。渣斗钢支架结构设计应满足在刮板捞渣机故障时能移出的检修要求。

2. 液压关断门

关断门由多块特制的板式门组成。正常运行时，关断门全部打开，插入上槽体水中组成炉底密封系统。当刮板捞渣机故障时，将关断门按一定顺序关闭，一般可关闭4h，以便不停炉对刮板捞渣机进行检修。随着刮板捞渣机质量的提高，现在大多数捞渣机的维修周期已能达到或超过3年的大修期，有的电厂刮板捞渣机不设液压关断门，可降低整个锅炉运转层高度，节省投资，已有多个成功运行案例。

若设置液压关断门，最高耐温按照800℃设计。液压关断门启、闭灵活，并应有液压关断门关闭时的闭锁装置。液压关断门的关键部件寿命不低于30000h。

## 二、风冷式干渣机

风冷式干渣机是火力发电厂煤粉锅炉的连续除渣设备，具有换热和输送两大基本功能。

### （一）设计要求

（1）风冷式干渣机宜每台炉配置一台，应采用连续除渣方式。

（2）风冷式干渣机设计出力不宜小于锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤种时排渣量的250%，且不小于燃用校核煤种吹灰时排渣量的110%。

（3）钢带式干渣机倾斜段倾角不宜大于33°，链板式干渣机倾斜段倾角不宜大于40°，鳞板式干渣机倾斜段倾角不宜大于45°。

（4）风冷式干渣机输送速度可以根据锅炉排渣量进行调节，其范围宜为0.4～4.0m/min。

（5）单台风冷式干渣机最大出力不宜超过50t/h，长度不宜超过60m。

（6）风冷式干渣机冷却风量可以根据锅炉排渣量和干渣机出口渣温进行调节，主风门开度调节范围为0%～100%。

（7）钢带式干渣机清扫链和链板式干渣机链条宜采用专用高耐磨链条，鳞板式干渣机输送带组件由套筒模锻链+鳞斗组成，采用耐磨、耐高温材料。

（8）渣斗和风冷式干渣机钢之间应设置格栅及大渣破碎装置，大渣破碎装置应具有关断门和破碎大渣的功能。渣斗的有效容积不宜小于储存锅炉最大连续蒸发量工况时4h的排渣量。渣斗采用独立支撑结构。

（9）风冷式干渣机冷却风进入炉膛的风量不宜超过锅炉燃烧总空气量的1%，风温不宜低于锅炉二次风温。系统输送设备正常工况下的排渣温度（储渣仓入口处）不宜大于150℃，最大出力时排渣温度不宜大于200℃。

### （二）设计计算

设备出力取决于输送钢带（链板、鳞斗）速度、输送钢带（链板、鳞斗）有效宽度、渣层平均厚度及炉渣的特性。风冷式干渣机出力可按式（4-5）进行计算

$$G=60b\delta v\rho \tag{4-5}$$

式中 $G$——风冷式干渣机出力，t/h；

$b$——输送钢带（链板、鳞斗）有效宽度，m；

$\delta$——渣层平均厚度，m；

$v$——输送钢带（链板、鳞斗）速度，m/min；

$\rho$——底渣堆积密度，$t/m^3$。

### （三）设备选型

1. 结构型式

（1）钢带式干渣机。钢带式干渣机主要由干渣机本体及相应的电控设备组成。其中，干渣机本体由耐热输送钢带组件、刮板清扫链组件、驱动装置、张紧装置、钢带托辊组、钢带托轮组及限位轮组和承压箱体构成；电控设备由电动机驱动控制及保护装置、报警检测装置组成。

耐热输送钢带组件包括耐热不锈钢丝网、承载板及连接件。刮板清扫链组件包括清扫刮板、传动链及连接件。驱动装置包括钢带驱动装置和清扫链驱动装置，钢带驱动装置包括变频电动机、减速器、驱动滚筒；清扫链驱动装置包括变频电动机、减速器、驱动链轮。张紧装置包括钢带张紧装置和清扫链张紧装置，液压张紧承载箱体采用全封闭结构型式，由侧壁、底板和密封罩体组成，侧壁和密封罩体设有可调节开度的进风口和观察设备运行的观察窗。

1）钢带式干渣机壳体采用重型H型钢作为骨架。

2）钢带式干渣机分为两层，上层布置输送钢带，用于输送干渣；下层布置刮板清扫链，用于将散落至排渣机壳体底层的细灰刮至后续输送系统。

3）钢带式干渣机钢带网带采用双股螺旋网条+串条结构，由于具有弯曲较深的串条，使各个螺旋网条的位置得到正确的定位，最大限度地减少网带的变形和延伸，钢带不断带可靠率高。

4）钢带式干渣机所有轴承座设计在箱体外侧，托辊、托轮等转轴与箱体侧板间有防尘密封，轴承在常温、无尘环境下运行，保证了可靠性。

5）钢带式干渣机拥有独立的清扫链系统，采用耐高温、耐磨、高强度链条。

钢带式干渣机整体结构图见图4-12，钢带式干渣机输送钢带外观图见图4-13。钢带式干渣机输送钢带断面示意图见图4-14。

(a)

(b)

图 4-12　钢带式干渣机整体结构图

(a) 纵断面结构图；(b) 横断面结构图

1—钢带驱动；2—清扫链驱动；3—头部风门；4—事故喷淋装置；5—钢带托辊；6—钢带托轮；7—清扫链托链轮；8—限位轮；9—钢带侧风门；10—钢带张紧装置；11—清扫链张紧装置；12—清扫链改向链轮；13—钢带改向滚筒；14—钢带；15—清扫链；16—刮板组件

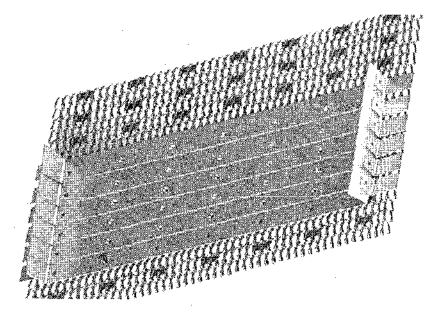


图 4-13　钢带式干渣机输送钢带外观图

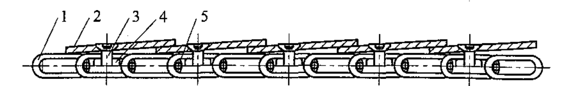



图 4-14　钢带式干渣机输送钢带断面示意图

1—网条；2—承载板；3—沉头螺钉；4—压板；5—串条

(2) 履带式链板干渣机。履带式干渣机是利用链轮传动圆环链条，带动连续搭接的输送链板来输送锅炉底渣的连续输送设备，通过干渣机头部和槽体两侧进风来实现底渣冷却。

履带式干渣机主要由驱动装置、头部驱动链轮、尾部改向链轮、输送圆环链、高低刮板、上层支撑托辊、下层支撑托辊、冷却进风系统及液压张紧系统等组成。

1) 履带式链板干渣机采用封闭的链板式输送技术：采用圆环链传动，叠加履带板为载体。履带式链板干渣机两侧的高强度、耐热、耐磨圆环链条带动链板完成输送过程，输送带通过全封闭的可互换性相连的链板组成，通过两侧连接器和圆环链条相连。炉渣落到链板上，在链板的移动中炉渣被冷却和输送到后续设备。驱动链轮采用可更换轮齿的

凹齿链轮。

2）履带式链板干渣机链轮链条传动相对钢带机摩擦传动的扭矩较大，链板储渣容积较多，输送能力较强。可以实现大倾角一步上渣仓的输送方式，最大角度可达40°。

3）履带式链板干渣机为自清扫结构，没有清扫链系统。履带式干渣机普通链板（低刮板）和清灰链板（高刮板）在履带式链板干渣机上层都起到冷却和输送炉渣的作用，清灰链板在回程时能将落入壳体底部的细灰重新刮取到尾部随落下的炉渣一起重新输送到干渣机头部，从而起到自清扫的功能。

4）履带式链板干渣机输送链条与炉渣不接触，链条磨损量小，热变形小。

5）头部驱动装置采用变频电动机减速机驱动。

履带式干渣机整体结构图见图4-15，履带式干渣机局部构件图见图4-16。

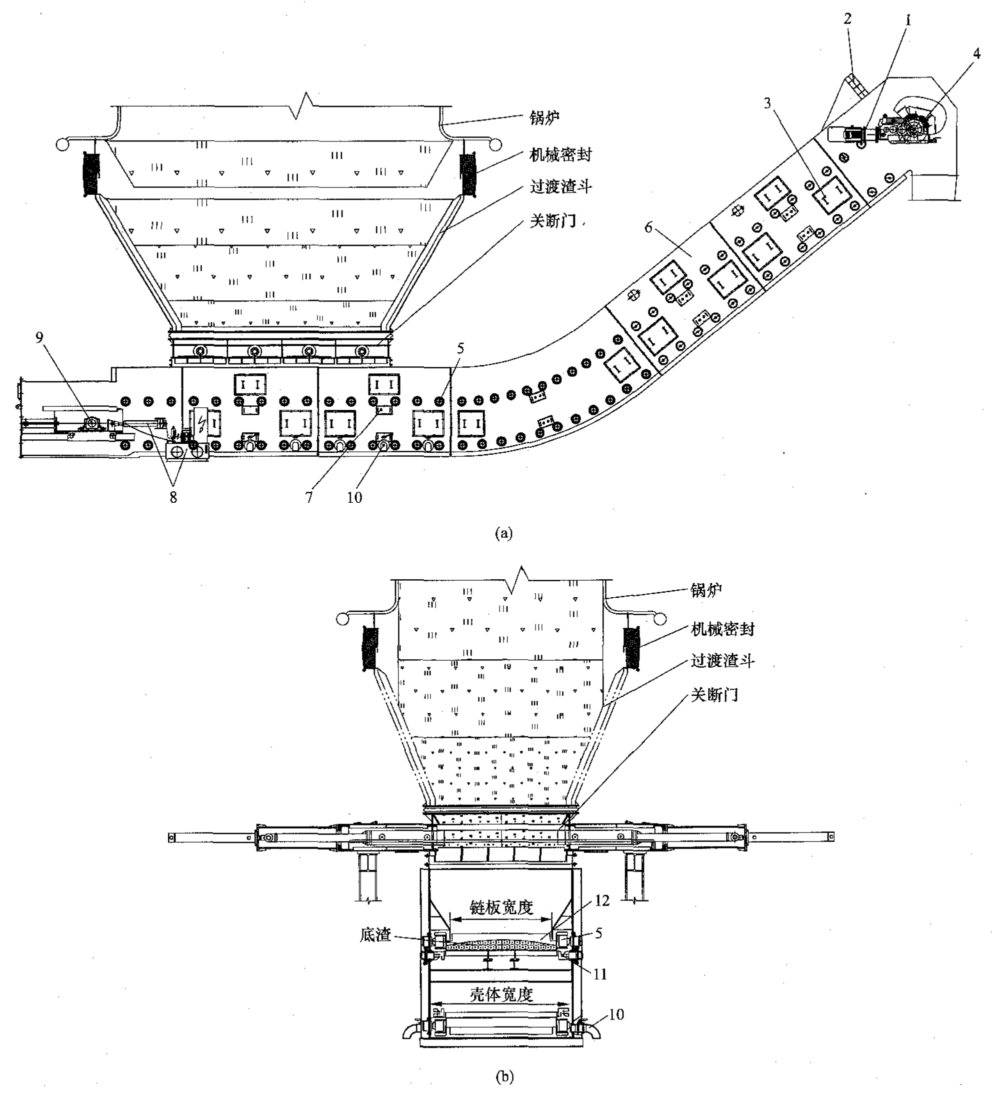



图4-15 履带式干渣机整体结构图

（a）纵断面结构图；（b）横断面结构图

1—驱动装置；2—头部风量调节门；3—支撑架；4—头部驱动链轮；5—支撑托辊；6—槽体；7—纠偏装置；8—张紧装置；9—尾部改向链轮；10—水平进风口；11—牵引链条；12—链板

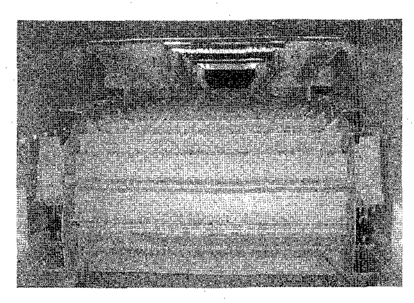


图 4-16 履带式干渣机局部构件图

（3）鳞斗式干渣机。鳞斗式干渣机主要由干渣机本体及相应的电控设备组成。干渣机本体有输送带组件、驱动装置、张紧装置、托辊组、托轮组及限位轮组及承载箱体；电控设备由电动机驱动控制及保护装置组成。输送带组件由套筒模锻链+鳞斗组成，采用耐磨、耐高温材料。链条具有互换性，材料选用低碳合金钢锻造，表面硬化处理，表面硬度 HV≥700；相邻鳞斗间连接为线接触，减少磨损。其钢管材质性能不低于 20 钢；承载料斗采用冲压增加其强度。

1）鳞斗式干渣机是依靠鳞斗为灰渣和换热载体，套筒模锻链为传动中心，具有同步自清扫的功能，同时套筒模锻链强度和耐磨性较高。

2）鳞斗式干渣机具有输送渣量多、输送距离长、大倾角等特点，可实现大倾角一步上渣仓的输送方式，最大角度可达 45°。

3）冷空气从相邻鳞斗间缝隙穿过，与热渣实现底部、内部、上部换热。

鳞斗式干渣机整体结构图见图 4-17，鳞斗式干渣机局部构件图见图 4-18。

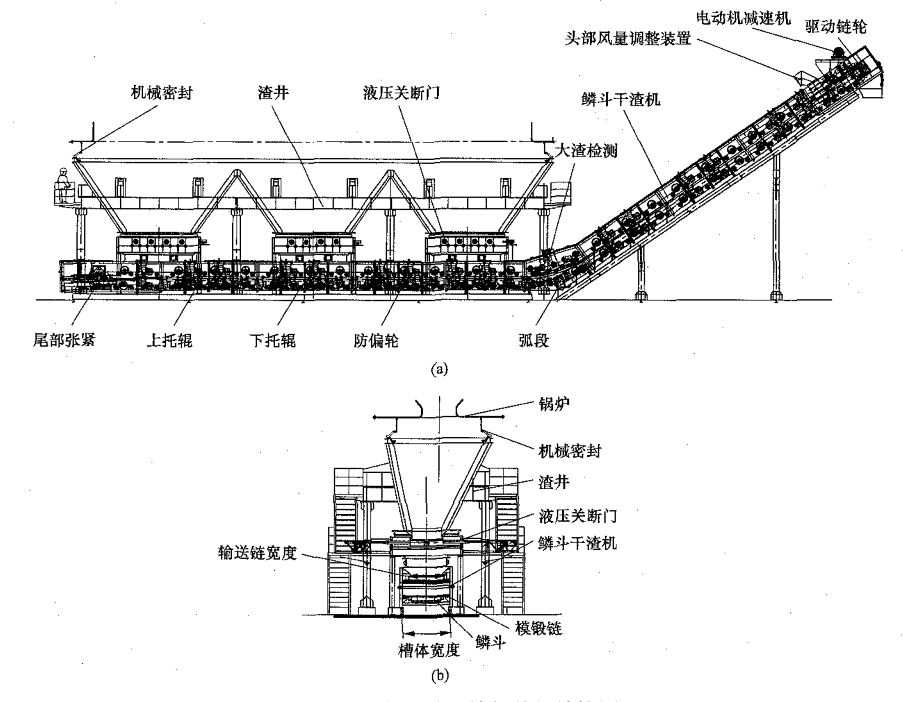



图 4-17 鳞斗式干渣机整体结构图

（a）纵断面结构图；（b）横断面结构图

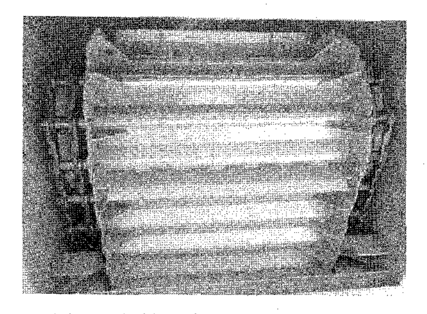


图 4-18 鳞斗式干渣机局部构件图

2. 主要技术参数

（1）钢带式干渣机。常用典型钢带式干渣机的主要技术参数见表 4-2，供设计时参考。在工程实际应用中，还需根据机组容量、锅炉炉型、煤质特性、渣量等因素合理选择设备。

（2）履带式链板干渣机。常用典型履带式链板干渣机的主要技术参数见表 4-3，供设计时参考。在工程实际应用中，还需根据机组容量、锅炉炉型、煤质特性、渣量等因素合理选择设备。

（3）鳞斗式干渣机。常用典型鳞斗式干渣机的主要技术参数见表 4-4，供设计时参考。在工程实际应用中，还需根据机组容量、锅炉炉型、煤质特性、渣量等因素合理选择设备。

表 4-2　　常用钢带式干渣机的主要技术参数

| 规格 | 槽体宽度（mm） | 钢带有效宽度（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） | 规格 | 槽体宽度（mm） | 钢带有效宽度（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GPZS08 | 1200 | 800 | 70 | 15 | 33 | 7.5 | GPZS12 | 1588 | 1200 | 70 | 40 | 33 | 15 |
| GPZS10 | 1388 | 1000 | 70 | 25 | 33 | 11 | GPZS14 | 1788 | 1400 | 70 | 60 | 33 | 15 |

注　钢带式干渣机目前投运的最长总长度为 65.75m。

表 4-3　　常用履带式链板干渣机的主要技术参数

| 规格 | 槽体宽度（mm） | 链板宽度（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） | 规格 | 槽体宽度（mm） | 链板宽度（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DRYCON12 | 1200 | 800 | 15～40 | 1～5 | 25～40 | 5.5/7.5 | DRYCON20 | 2000 | 1600 | 20～70 | 35～60 | 25～40 | 15/18.5/22 |
| DRYCON16 | 1600 | 1200 | 20～70 | 5～25 | 25～40 | 7.5/11/15 | DRYCON24 | 2400 | 2000 | 20～90 | 55～80 | 25～40 | 18.5/22 |
| DRYCON18 | 1800 | 1400 | 20～70 | 20～40 | 25～40 | 11/15/18.5 | DRYCON26 | 2600 | 2200 | 20～90 | 75～90 | 25～40 | 22/30 |

注　履带式链板干渣机目前投运的最长总长度为 66m。

表 4-4　　常用鳞斗式干渣机的主要技术参数

| 规格 | 槽体宽度（mm） | 输送链宽度有效（mm）/总宽（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） | 规格 | 槽体宽度（mm） | 输送链宽度有效（mm）/总宽（mm） | 总长度=水平段总长+倾斜段总长（m） | 出力（t/h） | 输送角度（°） | 电动机功率（kW） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GLD12 | 1330 | 800/1200 |  | 5～30 |  | 7.5～15 | GLD18 | 1930 | 1400/1800 |  | 20～55 |  | 15～30 |
| GLD14 | 1530 | 1000/1400 | 25～80 | 10～40 | 20～45 | 11～22 | GLD20 | 2130 | 1600/2000 | 25～80 | 25～60 | 20～45 | 15～37 |
| GLD16 | 1712 | 1200/1600 |  | 15～50 |  | 15～22 | GLD22 | 2330 | 1800/2200 |  | 30～70 |  | 15～45 |

注　鳞斗式干渣机目前投运的最长总长度（鳞斗式干渣机水平段长度与斜升段长度之和）为 65m。

（四）风冷式干渣机的附属设备

1. 渣斗

风冷式干渣机所配渣斗与刮板捞渣机所配渣斗相类似，不同点为风冷式干渣机所配渣斗进出口中心不在同一直线上。

2. 机械密封

风冷式干渣机与锅炉炉膛之间大多采用机械密封结构（机械密封布置空间较小），少数采用无溢流型水密封结构［见图 4-11（b）］，满足锅炉各方位的自由膨胀。

机械密封能吸收锅炉各方向的膨胀量。机械密封由上下接管、隔热层、蒙皮、上下压板、固定螺栓组成，隔热层采用不锈钢丝网加强。机械密封所选材料能承受的正负压应与锅炉的炉膛压力保护值相适应。机械密封长期承受一定的压力。承受负压时，机械密封对锅炉水冷壁梳形板作用力向炉内；承受正压时，机械密封对锅炉水冷壁梳形板作用力向炉外。

3. 炉底排渣装置

渣井与风冷式干渣机之间应设炉底排渣装置，该装置需要具有关断门及防止大渣块直接冲击排渣机和破碎大渣块的作用，炉底排渣装置用于风冷式干渣机及后续输送系统发生故障时的检修工况。炉底排渣装置由隔栅、挤压头、箱体、驱动液压缸和摄像监视系统及液压泵站及管路部分组成，应能满足如下技术要求：

（1）炉底排渣装置采用防护格栅结构，能够有效地防止大渣下落造成设备的冲击破坏，防止结焦对风冷排渣机的损坏。格栅尺寸不宜大于 300mm×300mm。

（2）炉底排渣装置中的挤压头部件采用液压驱动，开关灵活，起到了隔离门的作用。同时其能有效地实现大渣块的预冷却、预破碎，200mm 以上的渣块，首先落到隔栅上，得到预冷却。然后经水平移动的齿形挤压头将其破碎，由风冷式干渣机运出。

（3）炉渣下落及破碎过程，均由摄像系统监视。

（4）挤压头在合拢状态，起开闭渣斗的作用。

（5）隔栅、挤压头采用耐高温、耐磨材料，热变形小。

## 三、滚筒冷渣器

滚筒冷渣器用于循环流化床及沸腾床锅炉的热渣冷却，冷却介质以水冷为主、风冷为辅。

### （一）设计要求

（1）滚筒冷渣器设计总出力不小于锅炉最大连续蒸发量工况燃用设计煤种时排渣量的 150%，且不小于燃用校核煤种时排渣量的 120%。同时，宜根据滚筒冷渣器设计总出力的要求选择每台滚筒冷渣器的出力和冷渣器的台数，容量上至少考虑 1 台冷渣器备用。滚筒冷渣器采用连续除渣方式。

（2）滚筒冷渣器排渣后续输送设备当采用链斗式或刮板式输送机输送时，出渣温度应小于 150℃；滚筒冷渣器排渣后续输送设备当采用气力输渣或高温皮带输送机输送时，出渣温度应小于 120℃或更低。

（3）滚筒冷渣器的冷却水水质应选择除盐水或凝结水，冷却水系统进出口管道上应装设压力和温度测点，出口管道上还须装设流量计和安全阀，安全阀的排放口须引至安全区域。

（4）滚筒冷渣器承压部件按压力容器要求设计，滚筒冷渣器本体的设计压力不低于最高工作压力（冷却水的最大压力）。

（5）滚筒冷渣器应采取有效措施，保证筒体膨胀畅通。滚筒冷渣器筒体外表面温度不应超过 60℃。

（6）滚筒冷渣器进渣管结构形式可采用水冷式或绝热式，应满足三维膨胀补偿量的要求，且密封严密可靠。

（7）应在滚筒冷渣器进渣管上安装高温进渣阀。

（8）滚筒冷渣器渣侧采用负压密封，可用管道接入空气预热器出口烟道，所涉及管道均须满足防磨保温要求。

（9）滚筒冷渣器的驱动电动机及变频器应满足滚筒冷渣器满载启动的要求。

### （二）设计计算

（1）滚筒冷渣器出力计算。炉渣和冷却水的换热在滚筒冷渣器的本体内完成，炉渣放热量等于冷却水吸热量和滚筒冷渣器散热之和。采用热平衡法计算滚筒冷渣器的出力，可按式（4-6）计算

$$G=\frac{c_2Q(t_{22}-t_{21})}{c_1(t_{11}-t_{12})}\times\frac{100}{100-\xi} \tag{4-6}$$

式中 $G$——滚筒冷渣器的出力，kg/h；

$Q$——冷却水流量，kg/h；

$c_1$——炉渣平均比热容，kJ/（kg·℃），参见 GB 10184；

$c_2$——冷却水的平均比热容，kJ/（kg·℃），参见 GB 10184；

$t_{11}$、$t_{12}$——进渣温度和排渣温度，℃，分别按照锅炉排渣温度和设计要求的滚筒冷渣器排渣温度确定；

$t_{21}$——冷却水进水温度，℃，考虑湿冷或空冷机组在冬季、夏季等不同工况，根据机组回热系统冷侧水温确定；

$t_{22}$——冷却水出水温度，℃，在满足设计要求的滚筒冷渣器排渣温度的前提下，考虑回收热量，根据机组回热系统配置，并与设备厂家配合确定；

$\xi$——滚筒冷渣器的散热损失率（一般取 1%），%。

（2）滚筒冷渣器冷却水量的计算。滚筒冷渣器冷却水量可按式（4-7）计算

$$Q=0.24G(t_{11}-t_{12})/(t_{21}-t_{22}) \tag{4-7}$$

式中 $Q$——冷却水量，kg/h；

$G$——设备出力，kg/h。

### （三）设备选型

1. 结构形式

（1）双层圆筒式滚筒冷渣器。双层圆筒式滚筒渣器由进渣装置、筒体组件、出渣装置、底座组件、驱动机构、冷却水系统和电控装置等组成。双层圆筒式滚筒冷渣器工作原理图见图 4-19，双层圆筒式滚筒冷渣器结构图见图 4-20。

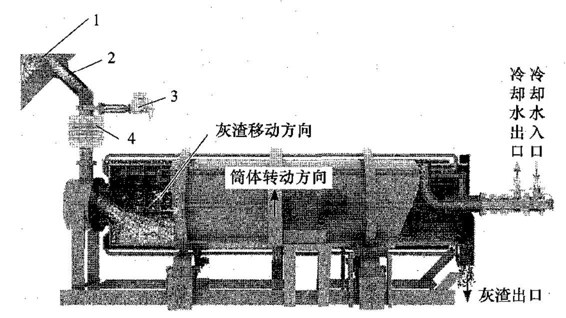



图 4-19 双层圆筒式滚筒冷渣器工作原理图

1—锅炉排渣口；2—锅炉落渣管；3—高温闸阀；4—波纹补偿器

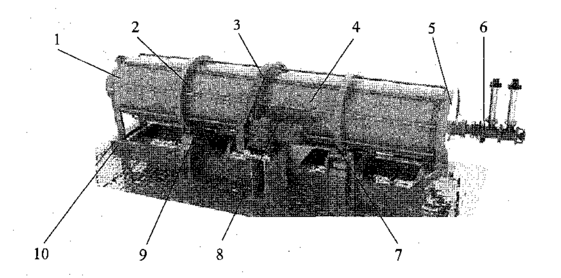



图 4-20 双层圆筒式滚筒冷渣器结构图

1—进渣装置；2—支撑圈；3—大链轮；4—筒体组件；5—出口组件；6—旋转接头；7—挡轮组件；8—驱动机构；9—支撑轮；10—底座

双层圆筒式滚筒冷渣器是采用双层圆筒夹层内的冷却水，通过内筒与灼热底渣进行换热冷却，传热效率高。传动机构采用变频电动机，通常根据锅炉床料层厚度变化，通过手动调节电动机转速来调节滚筒冷渣器的出力；也可以把锅炉床压信号接至滚筒冷渣器的电控箱，实现自动调节。

（2）膜式（分仓式）滚筒冷渣器。膜式（分仓式）滚筒冷渣器本体一般包括进渣箱、滚筒、出渣箱、传动装置、电控系统、热控系统和底座。膜式（分仓式）滚筒冷渣器外部结构图见图4-21。膜式（分仓式）滚筒冷渣器内部构件图见图4-22。

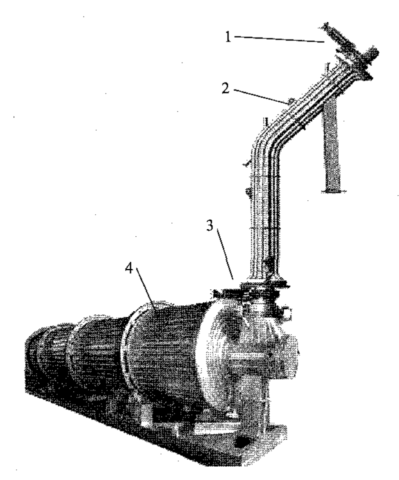



图4-21 膜式（分仓式）滚筒冷渣器外部结构图
1—电动渣阀；2—膜式壁下渣管；
3—三维膨胀节；4—筒体

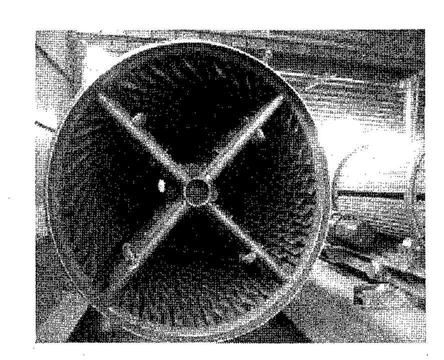


图4-22 膜式（分仓式）滚筒冷渣器内部构件图

膜式（分仓式）滚筒冷渣器是通过膜式钢管组成的冷却仓，冷却仓内的渣与膜式管束内的水进行换热。炉渣从锅炉排渣口通过灰渣阀和膨胀节进入进渣箱，再送入转动的旋转滚筒，在滚筒里面实现热交换并通过百叶片的抛洒，将炉渣排至出渣箱，通过出渣箱的排渣口送到下级输渣设备中。

传动系统一般采用变频电动机驱动，链条传动；通常根据锅炉床料层厚度变化，通过手动调节电动机转速来调节滚筒冷渣器的出力；也可以把锅炉床压信号接至滚筒冷渣器的电控箱，实现自动调节。

旋转滚筒式冷渣机的核心部件和膜式（分仓式）冷渣机的滚筒及滚筒内部的换热面全部采用锅炉钢管组焊而成，通过滚筒内部分仓或多层滚筒＋百叶片的设计可以有效增加总的换热面积和有效换热面积（即和炉渣保持接触的换热面积）。

双层圆筒式滚筒冷渣器和膜式（分仓式）滚筒冷渣器具有以下特点：

1）相同点：

a. 两种滚筒冷渣器内一般不结焦、不堵渣，对底渣粒度的适应范围较广。

b. 两种滚筒冷渣器内热渣呈自然流动状态，热渣对设备磨损较轻。

c. 两种滚筒冷渣器设有变频电动机可控制滚筒转速，从而控制设备出力。

d. 两种滚筒冷渣器布置灵活，可适应炉侧、炉底、前墙、后墙布置的要求。

2）不同点：

a. 膜式（分仓式）滚筒冷渣器由于采用膜式壁结构，筒体承压能力较强。

b. 膜式（分仓式）滚筒冷渣器通过百叶片可提高灰渣的贴壁率，通过百叶式结构与分仓式、分层式的多种组合可以提高筒体的有效换热面积，设备出力较大，冷却效果较好。

2. 主要技术参数

（1）常用双层圆筒式滚筒冷渣器的主要技术参数见表4-5。

**表4-5 常用LGT型双层圆筒式滚筒冷渣器的主要技术参数**

| 规格型号 | 滚筒直径（mm） | 进出渣口中心距（m） | 出力（冷渣量）（t/h） | 电动机功率（kW） | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|
| LGT8-10 | 800 | 4～5 | 10 | 2.2 | 进渣量的4～6倍，详细见冷却水耗量计算式（4-7） |
| LGT10-12 | 1000 | 5～7 | 12 | 3 | |
| LGT12-15 | 1200 | 8～10 | 15 | 7.5 | |
| LGT15-25 | 1500 | 8～10 | 25 | 18.5 | |

（2）常用膜式（分仓式）滚筒冷渣器的主要技术参数见表4-6。

表 4-6　常用 WWR-XP 型膜式（分仓式）滚筒冷渣器的主要技术参数

| 规格型号 | 滚筒直径（mm） | 进出渣口中心距（m） | 出力（冷渣量）（t/h） | 电动机功率（kW） | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|
| WWR-XP5 | 1250 | 4～6 | 5 | 11 | 进渣量的2.5～6倍，详细见冷却水耗量计算式（4-7） |
| WWR-XP10 | 1500 | 6～10 | 10 | 15 | |
| WWR-XP15 | 1750 | 8～10 | 15 | 18.5 | |
| WWR-XP20 | 1750 | 8～10 | 20 | 22 | |
| WWR-XP25 | 2000 | 10 | 25 | 37 | |
| WWR-XP40 | 2500 | 12 | 40 | 55 | |
| WWR-XP50 | 2500 | 12 | 50 | 75 | |

## 四、埋刮板输送机

埋刮板输送机是一种在封闭的矩形断面的壳体中，借助于运动链条带动刮板输送粉尘状、小颗粒及小块状等散料的连续输送设备。目前，火力发电厂除灰渣系统使用的埋刮板输送机为耐磨重型，可以实现多点加料、多点卸料。

1. 设计要求

（1）输送灰渣的埋刮板输送机应采用专用耐温、耐磨、低速型埋刮板输送机。

（2）埋刮板输送机输渣时，埋刮板机输灰宜为单路布置。其设计出力应与前级除渣设备相匹配；输灰时，其设计出力不宜小于被输送物料量的200%。

（3）当采用水平型埋刮板输送机时，倾斜角度不宜大于10°；当采用倾斜型埋刮板输送机时，倾斜角度不宜大于30°。

（4）埋刮板输送机输送除尘器灰时应耐温150℃，输送干渣或省煤器灰时应耐温350℃。

2. 设计计算

埋刮板输送机可按式（4-8）进行出力计算

$$G = 3600\,bhv\rho C\eta \qquad (4\text{-}8)$$

式中　$G$——埋刮板输送机出力，t/h；

$b$——机槽宽度，m；

$h$——承载机槽高度，m；

$v$——刮板链条速度，可按0.04～0.08m/s选取；

$\rho$——物料堆积密度，$t/m^3$；

$C$——倾斜系数，可参照表4-7选取，或按制造厂商提供资料确定；

$\eta$——输送机效率，水平布置可按0.75～0.9选取，流动性较好、悬浮性较大的物料取下限值。

表 4-7　倾斜系数

| 角度 | 0°～5° | >5°～10° | >10°～15° | >15°～20° | >20°～25° | >25°～30° |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C$ | 1 | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.8 | 0.75 |

3. 设备选型

（1）设备结构形式。埋刮板输送机由头部驱动装置、中间机壳、尾部拉紧装置及刮板链条等部件所组成。头部是埋刮板输送机驱动部件，由壳体、头轮及头轮轴、轴承及轴承座、脱链器等零部件构成，根据需要可在头部安装防堵探测器。埋刮板输送机尾部主要是改向和张紧部件，由壳体、尾轮及尾轮轴、轴承及轴承座、机械张紧部件组成，根据需要可在尾部安装断链指示器。

埋刮板输送机是一种封闭的可水平输送、倾斜输送及垂直输送物料的设备。在输送物料过程中，埋刮板输送机是利用刮板移动带动物料颗粒移动，并使得物料颗粒间的内摩擦力克服物料与壳体之间产生的外摩擦阻力，使物料在输送时向前移动。单板链式埋刮板输送机剖视见图4-23，双板链式埋刮板输送机剖视图见图4-24。

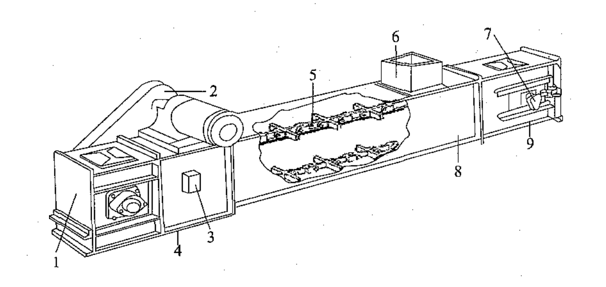



图 4-23　单板链式埋刮板输送机剖视图

1—头部；2—驱动装置；3—堵料探测器；4—卸料口；5—刮板链条；6—加料口；7—断链指示器；8—中间段；9—尾部

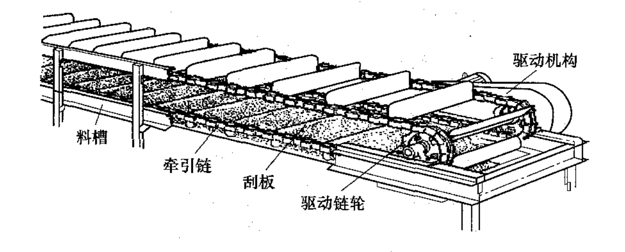



图 4-24　双板链式埋刮板输送机剖视图

（2）技术要求。埋刮板输送机驱动装置有水平和立式两种形式，可从埋刮板输送机尾部向头部看，区分其驱动装置是左装还是右装，设计时可按具体情况选用。当采用高位布置时应设置检修平台；埋刮板输送机露天布置时，驱动装置应采取防雨措施，各接口

法兰处应严密。

埋刮板输送机进料口中心距尾链轮中心间距最小尺寸不应小于1.4m；埋刮板输送机与进、出料管的连接宜为柔性连接。

埋刮板输送机宜采用优质合金钢模锻链作为牵引机构。模锻链具有结构简单、质量轻、强度高、耐磨损、寿命长、安装维修方便等优点。

埋刮板输送机技术规格（机槽宽度）可按250、315、400、500、630、800、1000mm 7种类型选取。刮板链条速度系列为0.04m/s、0.063m/s、0.08m/s。

输送灰渣所用埋刮板输送机的链条主要形式有模锻链（代号DL）、双板链（代号BL）。埋刮板输送机的刮板由扁钢、圆钢、方钢或角钢制成。埋刮板输送机的刮板主要形式有T型、BT型。

埋刮板输送机输送物料粒径见表4-8。

**表4-8　埋刮板输送机输送物料粒径**　（mm）

| 输送方式 | 硬度较高物料 | | 硬度较低物料 | |
|---|---|---|---|---|
| | 适当粒径 | 最大物料粒径 | 适当粒径 | 最大物料粒径 |
| 水平输送 | $<B/20$ | $<B/10$ | $<B/40$ | $<B/20$ |
| 垂直输送 | $<B/30$ | $<B/15$ | $<B/60$ | $<B/30$ |

注　*B*为输送机槽宽，mm。

常用MSM型埋刮板输送机的主要技术参数见表4-9。

**表4-9　常用MSM型埋刮板输送机的主要技术参数**

| 设备型号 | MSM20 | MSM25 | MSM32 | MSM40 | MSM50 | MSM63 | MSM80 | MSM100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 机槽宽度（mm） | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 |
| 输送量（$m^3/h$） | 15 | 24 | 35 | 50 | 70 | 100 | 150 | 200 |
| 最大输送距离（m） | 75 | 75 | 75 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 运行速度（m/s） | 0.04～0.08 | | | | | | | |

注　1. 例如MSM25，即机槽宽250mm水平型埋刮板输送机。
　　2. MSM型埋刮板输送机单机最大输送距离一般控制在45m以内。

4. 设备布置

埋刮板输送机，可采用水平布置和倾斜布置2种方案。当倾角为10°以内时，宜采用水平型，见图4-25；当倾角大于10°时，宜采用倾斜型，见图4-26。机械输送系统中可实现单机输送，也可串接输送；运行方式上能实现多点加料，工艺系统布置较为灵活。埋刮板输送机采用露天布置时，需在埋刮板输送机头部设置防雨装置或采用室外型电动机。

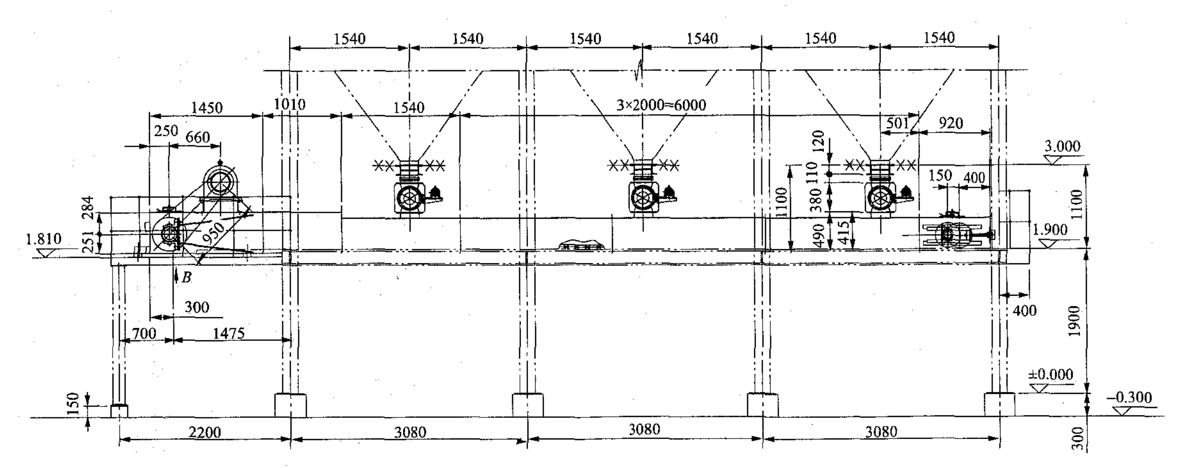



图4-25　埋刮板输送机水平布置图

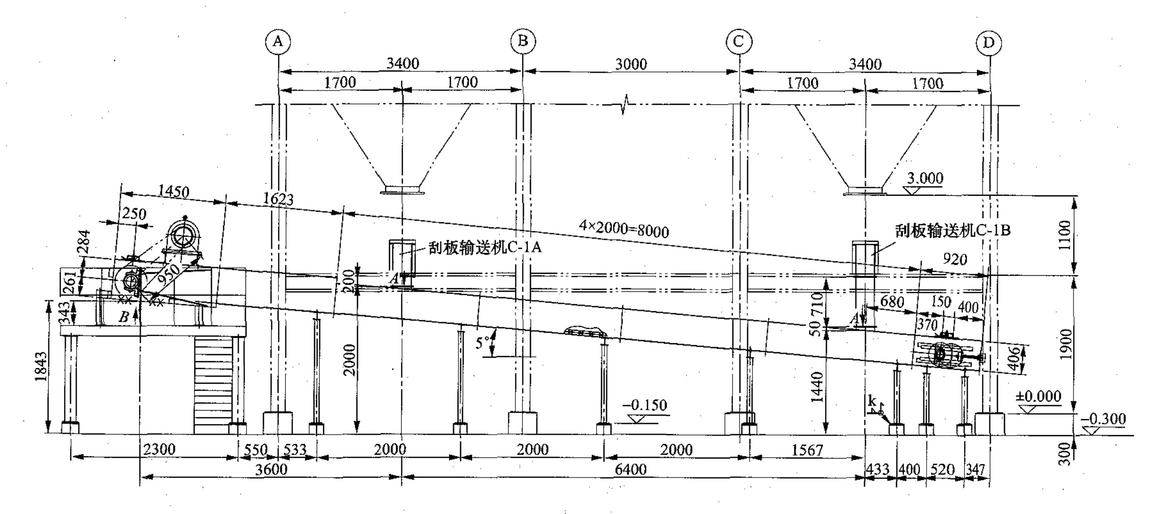



图 4-26 埋刮板输送机倾斜布置图

## 五、垂直斗式提升机

垂直斗式提升机是驱动机构带动挂着料斗的链条由下向上提升物料的机械设备，用于垂直经过破碎非黏性、松散颗粒或粉末粒状物料是火力发电厂除灰渣系统最常用的机械设备之一。垂直斗式提升机具有占地面积小，布置紧凑，输送量大，动力消耗低等特点。

1. 设计要求

（1）垂直斗式提升机设计出力应与前级输送系统或设备相匹配。

（2）垂直斗式提升机输送灰渣的粒度不宜大于100mm；输送除尘器灰时应耐温 150℃，输送干渣时应耐温 300℃，输送石子煤时应耐温 100℃。

（3）垂直斗式提升机输灰、输石子煤时，宜按单路设计；输煤粉炉渣时，宜按 1 运 1 备双路设计；输循环流化床炉渣时，宜按适应前级设备套数设计。

2. 设计计算

垂直斗式提升机出力 $G$（t/h）可按式（4-9）进行计算

$$G=3.6\psi v\rho V_0/l \tag{4-9}$$

式中 $V_0$——料斗有效容积，m³；

$l$——料斗间距，m；

$v$——料斗提升速度，m/s；宜按 0.25～0.5m/s 选取；

$\rho$——物料堆积密度，t/m³；

$\psi$——料斗充满系数，按表 4-10 选取。

**表 4-10 垂直斗式提升机料斗充满系数**

| 输送物料 | 充满系数 |
|---|---|
| 粒径小于 20mm | 0.7～0.95 |
| 粒径为 20～50mm | 0.6～0.8 |
| 粒径为 50～100mm | 0.5～0.7 |
| 粒径大于 100mm | 0.4～0.6 |

3. 设备选型

（1）设备结构形式。垂直斗式提升机主要是由尾部组件（含张紧装置等）、进料口、中间段壳体、料斗及链条总成、头部组件、头部护罩、头部落料斗等组成的机械输送设备。

火力发电厂除灰渣系统中的垂直斗式提升机的料斗牵引机构主要为环链和板链两种形式，环链垂直斗式提升机多采用双链结构，见图 4-27；板链垂直斗式提升机多采用单链结构，见图 4-28。板链重力卸料型垂直斗式提升机是最常用形式之一，尤其在循环流

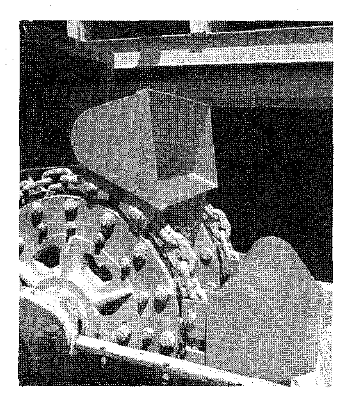


图 4-27 环链垂直斗式提升机设备剖视图

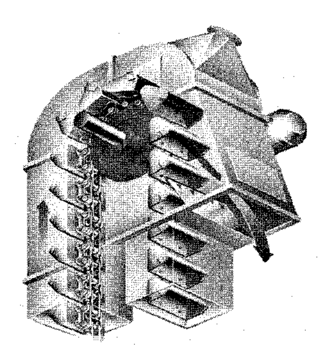


图 4-28 板链垂直斗式提升机设备剖视图

化床锅炉除灰渣系统中应用居多。在煤粉炉干式机械除灰渣系统中，垂直斗式提升机常作为干渣机将冷却后的底渣提升进入渣库。

垂直斗式提升机有环链式（TH 型）、板链式（TB 型）。其结构特点、用途及型号见表 4-11。

**表 4-11 TH、TB 型垂直斗式提升机特征参数**

| 类型 | TH 型 | TB 型 |
|---|---|---|
| 卸料特征 | 采用混合式卸料方式 | 采用重力式卸料方式 |
| 适用输送物料 | 松散物料，物料堆积密度不大于 1.5t/m³ 的颗粒、粉状、小块的无磨琢性、半磨琢性物料 | 松散物料，物料堆积密度不大于 2t/m³ 的中、大块状的磨琢性物料 |
| 适用温度（℃） | 被输送物料的温度不超过 250 | 被输送物料的温度不超过 250 |
| 提升高度（m） | 4.5～40 | 5～50 |
| 输送量（m³/h） | 35～365 | 20～480 |

（2）技术要求。

1）垂直斗式提升机料斗材质宜根据物料选择，充分考虑耐腐蚀性、耐磨性和光滑度；板式套筒滚子链条主要零部件材质应采用耐磨材质，包括链板、销轴、滚子、套筒，而且链条强度备用系数≥8，并保证链条的使用寿命不低于 15000h，表面硬度大于 HRC58；头、尾部应采用适合高强度滚子链运行的双轮缘结构链轮，轮齿材质采用高温、耐磨材料，硬度为 HRC45～50，头轴和尾轴均采用耐磨材质，硬度为 HB260～320；尾部拉紧装置有自动张紧和手动张紧两种方式，根据实际需要确定；垂直斗式提升机进出落料管均采用耐高温、耐磨材料，并且需保证安装角度大于安息角。垂直斗式提升机头部应配备检修平台扶梯及起吊装置。垂直斗式提升机应能适合连续或间断的运行方式，并能允许频繁启停及满载情况下能正常启动。

2）垂直斗式提升机应保证在 +50Pa 和 −30Pa 的正负压力下运行时不泄漏、不变形。

3）垂直斗式提升机的驱动装置应装有逆止器，防止突然断电导致装有物料的料斗反向运动造成设备损坏。垂直斗式提升机应配置有断链保护器。断链保护器安装于尾轴上并随轴转动，当垂直斗式提升机因过载运转、卡堵等原因使尾轴转速异常时，控制柜报警并自动停机，以确保设备安全。垂直斗式提升机上还应设有堵料报警开关。

（3）设备技术选型参数。常用 TB 系列和 TH 系列垂直斗式提升机主要技术参数见表 4-12 和表 4-13。

**表 4-12 TB 系列垂直斗式提升机主要技术参数**

| 设备型号 | TB250 | TB315 | TB400 | TB500 | TB630 | TB800 | TB1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 输送量（m³/h） | 25 | 46 | 75 | 120 | 190 | 310 | 480 |
| 最大提升高度（m） | 50 | 50 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 斗速（m/min） | 30 | | | | | | |
| 链条数量 | 1 | 2 | | | | | |

**表 4-13 TH 系列垂直斗式提升机主要技术参数**

| 设备型号 | TH315 | | TH400 | | TH500 | | TH630 | | TH800 | | TH1000 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 料斗形式 | ZH | SH | ZH | SH | ZH | SH | ZH | SH | ZH | SH | ZH | SH |
| 输送量（m³/h） | 35 | 60 | 60 | 94 | 75 | 118 | 114 | 185 | 146 | 235 | 235 | 365 |
| 最大提升高度（m） | 50 | | | | | | | | | | | |
| 斗速（m/min） | 84～108 | | | | | | | | | | | |

注 表中给出 ZH 型和 SH 型料斗分别表示浅斗和深斗。

4. 设备布置

除灰渣系统中使用垂直斗式提升机宜采用地上布置；在布置条件受到限制时，可以将其下部机座布置在地坑中，但需考虑设备检修维护空间、排水、安全等多方面因素。室外布置的地坑设计除满足设备检修空间需要外，还考虑防雨设施，并设置排污水系统。

垂直斗式提升机采用露天布置时，需在垂直斗式提升机头部设置防雨装置或采用室外型电动机。

## 六、链斗输送机

链斗输送机是驱动机构带动链条牵引料斗沿轨

道进行水平或倾斜输送的机械设备。它适用于输送非黏性、干性松散颗粒或粉末粒状物料，具有布置灵活、输送能力大、运行能耗低、输送坡度大等特点。链斗输送机适用于输送块状、密度较大的、磨琢性物料。链斗输送机是火力发电厂除灰渣系统最常用的机械设备之一，尤其在循环流化床锅炉除灰渣系统中应用较多；在煤粉炉干式机械除渣系统中，链斗输送机作为干式除渣机冷却后的底渣提升设备也常被使用。

1. 设计要求

（1）链斗输送机输灰、输石子煤时，宜按单路设计；输煤粉炉渣时，宜按1运1备双路设计；输循环流化床炉渣时，宜按适应前级设备套数设计。

（2）链斗输送机设计出力应与前级输送系统或设备相匹配。

（3）链斗输送机输送除尘器灰时应耐温150℃，输送干渣或省煤器灰时应耐温350℃。

（4）链斗输送机运行速度应可调，链速使用范围宜按0.1～0.25m/s选取。

（5）链斗输送机应加装整机防护罩结构，露天布置时驱动装置应设防雨措施。

2. 设计计算

链斗输送机输送出力 $G$（t/h）可按式（4-10）进行计算

$$G=3.6\psi v\rho V_0/l \tag{4-10}$$

式中 $V_0$——料斗有效容积，$m^3$；

$l$——料斗间距，m；

$v$——料斗提升速度，m/s；

$\rho$——物料堆积密度，$t/m^3$；

$\psi$——料斗充满系数，按表4-11选取。

3. 设备选型

（1）设备结构形式。

1）链斗输送机由尾部组件（含张紧装置等）、尾部护罩、进料口、中间段壳体（含弯曲段壳体、倾斜段壳体等）、链斗及链条总成（含支撑轨道等）、头部组件、头部护罩、头部落料口等部件组成，链斗输送机结构见图4-29。

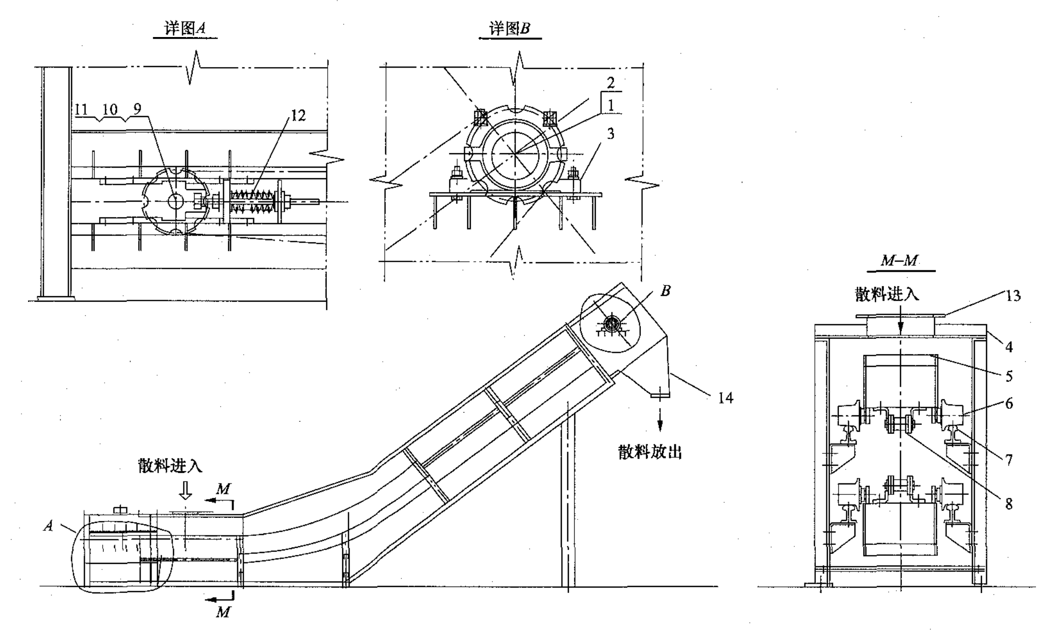



图4-29 链斗输送机结构图

1—主轴及电动机；2—主动链轮；3—主动轮轴承座；4—机壳；5—盛料斗；6—料斗支撑滚动轮；7—支撑轨道；8—传动链板；9—从动轴；10—从动链轮；11—从动轮轴承支座；12—张紧装置；13—进料装置；14—出料装置

2）链斗输送机的料斗是输送松散物料载具，料斗采用优质冷轧钢板制作，表面进行烧结涂层处理。烧结涂层覆盖料斗表面，保证表面清洁不污染物料；料斗表面光滑不易黏结物料，也适用输送黏性物料；烧结涂层具有优良的耐酸、耐碱及耐腐蚀性能，允许输送各种腐蚀性物料；该机用于输送高温物料，具有特殊性能。链斗输送机链条一般采用套筒滚子链，该链条制造工艺简单，使用范围广泛，滚动摩擦，降低能耗；组合部件数量较多，滚子与链条配合精度要求高。

链斗输送机链条根据输送物料的性质选材，若输送高温物料，链斗输送机链条选材应具有耐磨性能或耐高温性能。链斗输送机链条上装有滚轮，滚轮依附于轨道上滚动运行，相对于刮板机输送而言，摩擦阻力数值小，运行功率较小。

（2）设备技术选型参数。常用链斗输送机的主要

技术参数见表4-14和表4-15。

表4-14 链斗输送机主要技术参数（一）

| 链速（m/s） | 125系列 | | | | 200系列 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 料斗规格（断面弦长×宽度，mm×mm） | | | | | | |
| | 250×500 | 250×550 | 250×600 | 250×650 | 400×500 | 400×600 | 400×800 |
| | 输送能力（$m^3/h$） | | | | | | |
| 0.2 | 30 | 33 | 37 | 39 | 43 | 53 | 70 |
| 0.3 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 78 | 104 |
| 0.4 | 60 | 67 | 73 | 78 | 87 | 105 | 139 |
| 0.5 | 75 | 84 | 92 | 98 | 109 | 131 | 174 |
| 0.6 | 90 | 100 | 110 | 117 | 130 | 157 | 209 |
| 0.7 | 105 | 118 | 128 | 137 | 153 | 183 | 244 |
| 0.8 | 120 | 135 | 147 | 156 | 174 | 209 | 279 |

表4-15 链斗输送机主要技术参数（二）

| 链速（m/s） | 250系列 | | | | 300系列 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 料斗规格（断面弦长×宽度，mm×mm） | | | | | | |
| | 500×600 | 500×800 | 500×1000 | 500×1200 | 600×800 | 600×1000 | 600×1200 |
| | 输送能力（$m^3/h$） | | | | | | |
| 0.4 | 145 | 192 | 240 | 288 | 229 | 286 | 343 |
| 0.5 | 180 | 240 | 300 | 360 | 286 | 357 | 428 |
| 0.6 | 217 | 288 | 360 | 432 | 343 | 428 | 514 |
| 0.7 | 253 | 336 | 420 | 503 | 400 | 500 | |
| 0.8 | 491 | 384 | 480 | 575 | | | |

注 链斗输送机单机最长输送距离一般控制在60m以内。

4. 设备布置

链斗输送机倾斜段角度不宜大于50°。链斗输送机应加装整机保护罩结构，露天布置时驱动装置应设防雨措施或采用室外型电动机。

## 七、螺旋输送机

螺旋输送机是一种常用于水平、垂直、倾斜布置的连续输送设备，俗称绞笼。螺旋输送机常用来输送粉状或颗粒状松散干性物料，它的工作原理是转子上螺旋片将被输送物料沿壳体下半弧内壁推移进行输送。

1. 设计要求

（1）螺旋输送机输渣时，其设计出力应与前级系统或设备相匹配。

（2）螺旋输送机倾斜布置时一般不大于20°，工作环境温度一般要求在−20～50℃之间，被输送物料温度要求不大于200℃（水冷螺旋输送机除外），在电厂中主要用于短距离输送粉煤灰、渣及石子煤等。

（3）除灰渣系统中使用的螺旋输送机应采用专用耐温、耐磨、低速型。螺旋输送机输送除尘器灰时应耐温150℃，输送干渣或省煤器灰时应耐温350℃。

2. 设计计算

（1）螺旋输送机输送能力计算可按式（4-11）进行

$$G=47D^2\rho\psi nlC \tag{4-11}$$

式中 $D$——螺旋直径，m；

$\psi$——充满系数，见表4-16；

$\rho$——物料堆积密度，$t/m^3$；

$l$——螺旋节距，m；

$n$——螺旋转速，r/min；

$C$——倾斜系数，见表4-17。

表4-16 常用物料的充满、特性、综合系数

| 物料名称 | 物料粒径（mm） | 物料磨琢性 | 充满系数 $\psi$ | 综合系数 $A$ |
|---|---|---|---|---|
| 干炉粉、水泥、石膏粉 | ≥5 | 磨琢性 | 0.25～0.30 | 35 |
| 谷物、锯木屑、泥煤、颗粒状食盐 | ≥10 | 无磨琢性<br>半磨琢性 | 0.25～0.35 | 50 |
| 造型土、型砂、砂子、颗粒状锅炉底渣 | ≥30 | 磨琢性 | 0.25～0.30 | 30 |
| 煤、石灰石 | ≤60 | 无磨琢性<br>半磨琢性 | 0.25～0.30 | 40 |
| 卵石、砂岩、干渣 | ≥60 | 磨琢性 | 0.20～0.25 | 25 |
| 块煤、块状石灰石 | ≥60 | 无磨琢性<br>半磨琢性 | 0.20～0.25 | 30 |

表4-17 螺旋输送机倾斜系数

| 倾斜角$\beta$ | 0° | ≤5° | ≤10° | ≤15° | ≤20° |
|---|---|---|---|---|---|
| 螺旋输送机倾斜系数$C$ | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.65 |

（2）如果根据输送物料粒度需要选择较大螺旋直径，可维持输送量不变的条件下，选择较低的螺旋转速，以延长其使用寿命。

（3）螺旋转速在满足输送能力的条件下不宜过高，以免物料受过大的切向力而被抛起，以致无法向前输送。因此螺旋转速$n$不能超过其极限

转速 $n_j$

$$n \leqslant n_j = A/D^{0.5} \tag{4-12}$$

式中 $n$——螺旋转速，r/min；

$n_j$——螺旋极限转速，r/min；

$A$——物料综合特性系数，见表 4-16。

按式（4-12）计算的 $n_j$ 应取整为 20、30、35、45、60、75、90、120、150、190r/min。

（4）取整螺旋直径 $D$ 及转速 $n$ 的数值后，还须对充满系数进行验算。

（5）若验算出的 $\psi$ 值在表 4-16 推荐的范围内，则圆整值 $D$ 及 $n$ 是适当的；若 $\psi$ 值高于表 4-16 列数值上限，则应加大螺旋直径；若 $\psi$ 值低于表 4-16 列数值下限，则应降低螺旋转速。

3. 设备选型

（1）设备结构形式。

1）螺旋输送机按轴的数量可分为单轴螺旋输送机和双轴螺旋输送机。按壳体形状可分为 LS 型螺旋输送机和管型螺旋输送机。螺旋输送机具有结构简单、横截面尺寸小、密封性能好、重量轻、安装维修方便等优点。在螺旋输送机头节内装有止推轴承承受轴向力，在中间节和尾节内装有吊轴承支承螺旋轴。此外，在螺旋输送机尾节内还装有可轴向移动径向轴承，补偿螺旋轴长度误差和适应温度变化。

2）螺旋输送机主要由驱动装置、螺旋机本体、进料装置、螺旋叶片、外壳、头部轴承座、尾部轴承座、中间轴承装置、出料装置等几部分组成，实物图见图 4-30 和图 4-31。

（2）技术要求。在火力发电厂常用的螺旋输送机的螺旋直径分别为 150、200、250、300、400、500、600mm，长度为 3～70m，常见典型布置见图 4-32。

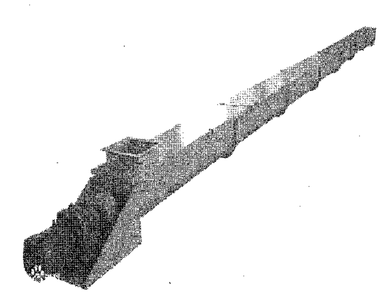


图 4-30　LS 型螺旋输送机设备实物图

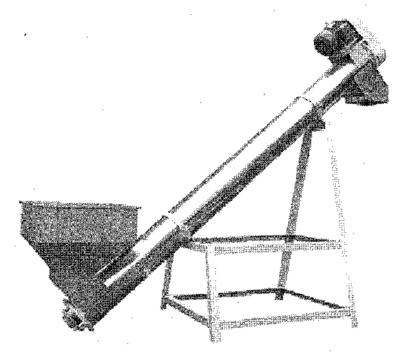


图 4-31　管型螺旋输送机设备实物图

对于颗粒度较大的物料，螺旋直径与被输送物料的粒径可按下面关系确定：

对于未分选物料

$$D \geqslant (8 \sim 10)d$$

对于分选物料

$$D \geqslant (4 \sim 6)d_{max}$$

式中 $D$——螺旋转子直径，mm；

$d$——物料平均粒径，mm；

$d_{max}$——物料最大粒径，mm。

（3）设备技术选型参数。常用 LS 型和管型螺旋输送机主要技术参数见表 4-18 和表 4-19。

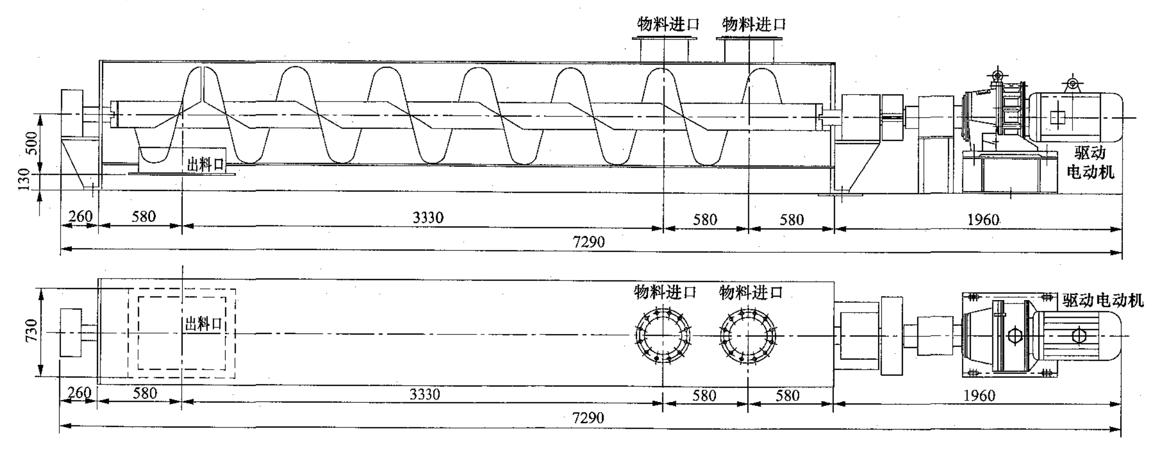



图 4-32　螺旋输送机典型布置图

表 4-18　　　　　　　　　　　　　　　　　LS 型螺旋输送机主要技术参数

| 型号规格 | | 螺旋直径 $D$（mm） | 螺距 $l$（mm） | 转速 $n$（r/min） | 输送量 $G$（m³/h） | 转速 $n$（r/min） | 输送量 $G$（m³/h） | 转速 $n$（r/min） | 输送量 $G$（m³/h） | 转速 $n$（r/min） | 输送量 $G$（m³/h） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $\psi=0.33$ | | $\psi=0.33$ | | $\psi=0.33$ | | $\psi=0.33$ |
| 小型 | LS100 | 100 | 100 | 140 | 2.2 | 112 | 1.7 | 90 | 1.4 | 71 | 1.1 |
| | LS125 | 125 | 125 | 125 | 3.8 | 100 | 3 | 80 | 2.4 | 63 | 1.9 |
| | LS160 | 160 | 160 | 112 | 7.1 | 90 | 5.7 | 71 | 4.5 | 56 | 3.6 |
| | LS200 | 200 | 200 | 100 | 12.4 | 80 | 9.9 | 63 | 7.8 | 50 | 6.2 |
| 中型 | LS250 | 250 | 250 | 90 | 21.8 | 71 | 17.2 | 56 | 13.6 | 45 | 10.9 |
| | LS315 | 315 | 315 | 80 | 38.8 | 63 | 30.5 | 50 | 24.2 | 40 | 13.4 |
| | LS400 | 400 | 355 | 71 | 62.5 | 56 | 49.3 | 45 | 38.6 | 36 | 31.7 |
| 大型 | LS500 | 500 | 400 | 63 | 97.7 | 50 | 77.6 | 40 | 62 | 32 | 49.6 |
| | LS630 | 630 | 450 | 50 | 138.5 | 40 | 110.8 | 32 | 88.6 | 25 | 69.3 |
| | LS800 | 800 | 500 | 40 | 198.5 | 32 | 158.8 | 25 | 124.1 | 20 | 99.3 |
| 特大型 | LS1000 | 1000 | 560 | 32 | 277.9 | 25 | 217.1 | 20 | 173.7 | 16 | 139 |
| | LS1250 | 1250 | 630 | 25 | 381.7 | 20 | 305.4 | 16 | 244.3 | 13 | 198.5 |

表 4-19　　　　　　　　　　　　　　　　　管型螺旋输送机主要技术参数

| 规格型号 | G15 | | G20 | | G25 | | G30 | | G40 | | G50 | | G60 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 技术参数 | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ | $n$ | $G$ |
| | 20 | 0.9 | 20 | 2.1 | 20 | 4.1 | 20 | 7.1 | 20 | 16.8 | 20 | 32.9 | 20 | 56.9 |
| | 30 | 1.3 | 30 | 3.2 | 30 | 6.2 | 30 | 10.9 | 30 | 25.3 | 30 | 49.4 | 30 | 85.3 |
| | 35 | 1.5 | 35 | 3.7 | 35 | 7.2 | 35 | 12.4 | 35 | 29.5 | 35 | 57.6 | 35 | 99.5 |
| | 45 | 2 | 45 | 4.7 | 45 | 9.3 | 45 | 16 | 45 | 37.9 | 45 | 74 | 45 | 128 |
| | 60 | 2.6 | 60 | 6.3 | 60 | 12.3 | 60 | 21.3 | 60 | 50.5 | 60 | 98.7 | 60 | 171 |
| | 75 | 3.3 | 75 | 7.9 | 75 | 15.4 | 75 | 26.6 | 75 | 63.2 | 75 | 123 | 75 | 213 |
| | 90 | 4 | 90 | 9.5 | 90 | 18.5 | 90 | 32 | 90 | 75.8 | 90 | 148 | 90 | 256 |
| | 120 | 5.3 | 120 | 12.6 | 120 | 24.7 | 120 | 42.6 | 120 | 101 | — | — | — | — |
| | 150 | 6.6 | 150 | 15.8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 190 | 8.4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

注　1. $n$ 表示转速，r/min（偏差允许在 10%范围内）。
2. $G$ 表示输送量，m³/h。
3. 输送量是在充满系数 $\psi=0.35$ 时计算的。
4. 螺旋输送机单机输送长度一般控制在 30m 以内。

4. 设备布置

在火力发电厂中螺旋输送机通常使用在空间狭小区域对物料进行提升、转运。螺旋输送机采用露天布置时，需在机头部设置防雨装置或采用室外型电动机。电厂螺旋输送机适宜布置在锅炉中速磨煤机下用于提升石子煤至石子煤斗，以及除尘器灰斗下输灰等。螺旋输送机也可适合在露天条件下运行，在高寒地区使用时要对两端轴承进行保温预热处理，停机后需要清空壳体内物料，不能进行负荷启动。

## 八、振动输送机

振动输送机工作原理是通过激振器强迫承载体按一定方向做简谐振动或近似于简谐振动，当其振动的加速度达到某种特定数值时，物料产生周期性的抛掷运动而完成向前输送物料。振动输送机主要适用于块状、粉粒状物料的输送。振动输送机结构简单、自

重较轻而功耗低，可实现封闭输送物料。振动输送机在火力发电厂中主要应用在中速磨煤机排出的石子煤输送和锅炉底渣输送系统中，振动输送机设备结构原理见图4-33。

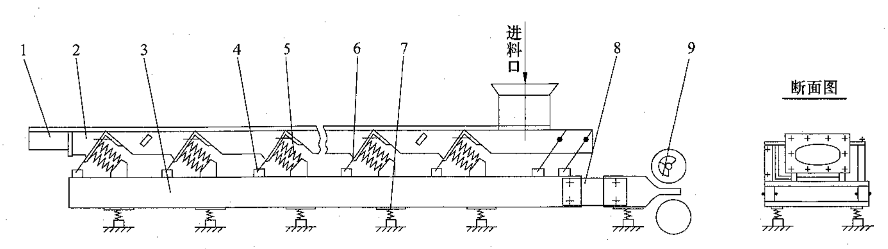



图4-33　SFZ型电磁振动输送机设备结构原理图

1—料槽体；2—机架；3—底架；4—导向支承；5—工作弹簧；6—导向板弹簧；7—减振弹簧；8—推力弹簧；9—驱动激振源

1. 设计要求

（1）振动输送机输渣时，其设计出力应与前级系统或设备相匹配。

（2）振动输送机一般按水平方向输送物料，如需倾斜输送，最大倾斜角度一般不大于10°。

（3）被输送物料温度一般不大于200℃，在电厂中主要用于短距离输送石子煤等物料。

（4）单台振动输送机水平输送距离不宜超过30m。

2. 设备选型

（1）设备结构形式。

1）振动输送机由料槽体、机架、底架、导向支承、工作弹簧、驱动激振源减振弹簧、振幅显示牌和电气控制装置等多个部件组成。

2）振动输送机按照物料输送方向可分为水平型和垂直型，在火力发电厂一般使用水平型振动输送机。按驱动方式的不同可分为电磁、气力、液压、机械振动输送机，而机械振动输送机又可分为惯性振动型和偏心连杆振动型。在火力发电厂生产中主要应用的是电磁振动输送机。

3）振动输送机可以水平输送各种中等粒径以下颗粒状物料，输送物料水分一般不大于7%～8%。

（2）技术要求。

1）振动输送机能满足机槽内及进料管积满物料时带负荷启动，振动输送机设计充分考虑系统启停时共振，尽量避开其共振点或将其控制在最低限度内。

2）振动输送机与上下级设备间的连接均应采用耐磨柔性接头连接，各级设备之间的接口应密封严密。

3）一般情况下，在火力发电厂中通常选用水平型电磁振动输送机用于输送中速磨煤机下石子煤，电磁振动输送机采用全封闭结构，机槽投影宽度最大可达630mm，输送速度不大于16.2m/min，输送能力最大可达70t/h。

4）常用SFZ型电磁振动输送机主要技术参数见表4-20。

**表4-20　电磁振动输送机主要技术参数**

| 项　　目 | 技　术　数　据 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | SFZ-315 | SFZ-400 | SFZ-500 | SFZ-630 |
| 料槽宽 $b$（mm） | 315 | 400 | 500 | 630 |
| 输送距离 $L$（m） | 10～50 | 10～50 | 10～30 | 10～30 |
| 输送能力（水平）$G$（t/h） | 5～25 | 5～40 | 1～50 | 10～70 |
| 输送速度 $v$（m/s） | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 |
| 机槽振幅 $s$（mm） | 4～8 | 4～8 | 4～8 | 4～8 |
| 频率 $f$（Hz） | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 谐振角 $\beta$（°） | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 物料粒径 $D$（mm） | ≤100 | ≤150 | ≤200 | ≤350 |
| 电动机功率 $P$（kW） | 1.5×2 | 2.2×2 | 3.2×2 | 5.5×2 |

注　生产能力 $G$ 以物料堆积密度1.6t/m$^3$为计算标准。

3. 设备布置

（1）振动输送机在隧道内布置时，应考虑检修维护空间，两侧均应有检修空间，至少一侧有宽度不小于800mm、高度不小于2.5m的运行维护通道。隧道内应设有设备安装维护孔、通风、照明、冲洗和排水设施，露天布置时，驱动装置应采取防护措施。

（2）振动输送机在隧道内布置时应考虑隧道内空气中含尘量不超过10mg/m$^3$（标准状况下），并应设有通风设施；同时，还应考虑输送不同属性物料（如石子煤等）防尘防爆措施。

（3）振动输送机可根据设备布置需要逐级顺序连接，在火力发电厂石子煤系统中应用最为典型，振动输送机串联系统布置图见图4-34。

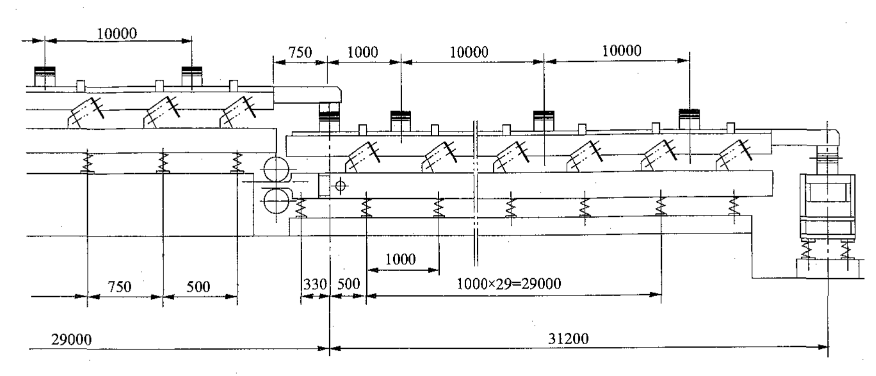



图 4-34 振动输送机串联系统布置图

## 九、碎渣机

碎渣机是火力发电厂锅炉底渣破碎的主要设备，也可用于建材、化工等领域松散物的破碎。

1. 破碎机结构形式及特点

按破碎前后物料粒径大小划分，破碎一般可分为粗碎、中碎和细碎三种（见表 4-21）；按转子结构形式可分腭式、旋回式、圆锥式、锤击式、反击式五种；按转子的数量可分为单辊、双辊、三辊式三种；按工作介质的状态可分为干式和湿式两种。不同形式的破碎机破碎比见表 4-21 和表 4-22。

表 4-21 破碎粒径的划分

| 项 目 | 粗 碎 | 中 碎 | 细 碎 |
|---|---|---|---|
| 入料粒径（mm） | 300～900 | 100～350 | 5～100 |
| 出料粒径（mm） | 100～350 | 20～100 | 5～15 |

表 4-22 几种破碎机的破碎比

| 破碎机形式 | 腭式、旋回式、腭旋式 | 单辊式 | 圆锥式 | 锤击式 | 反击式 |
|---|---|---|---|---|---|
| 破碎比范围 | 3～5 | 4～8 | 3～6 | 10～25 | 10～25 |

2. 设备选型

一般火力发电厂除渣系统使用的破碎机通常简称为碎渣机，应用较为广泛的是 DGS 系列单辊碎渣机。碎渣机主要由主机（锤齿、锤座、主轴机件、机体等）、驱动装置（减速机、电动机、张紧装置）、控制柜（电气控制元件、操作按钮）等部分组成。单辊碎渣机（见图 4-35、图 4-36）的锤齿、锤座等易损部件选用高硬度耐磨合金，正常使用寿命在 17000h 以上，主轴、幅板选用不锈钢材料；具有合理的轴挡密封结构，保持工作环境清洁；具备应急反转、过载保护、故障报警等功能电气保护措施。DGS 系列单辊碎渣机可用于湿式或干式除渣系统，可满足 10～65t/h 处理量的要求。单辊碎渣机破碎粒径一般不小于 20mm。

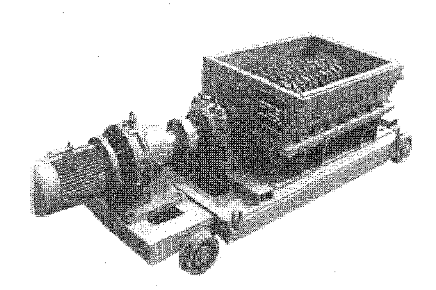


图 4-35 直连式单辊碎渣机

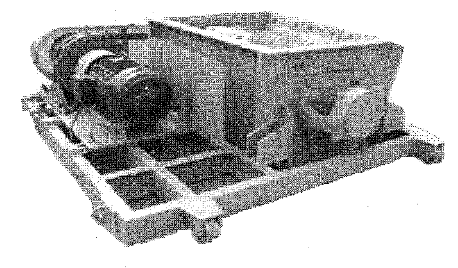


图 4-36 链条传动式单辊碎渣机

近年来，在火力发电厂中需要将炉底渣破碎后采用气力输送方式输送至渣库中再由汽车转运置灰场或综合利用用户。采用气力输送方式输送炉底渣需要将炉底渣破碎至 10mm 以下，需采用两级碎渣机串联，一级碎渣机采用单辊碎渣机，二级碎渣机采用双辊碎渣机。耐高温型碎渣机耐温宜控制在 200℃以内。

常用 DSG 型及 GDGS 型单辊碎渣机主要技术参数表见表 4-23。

表 4-23　　单辊碎渣机主要技术参数

| 形式 | 湿式单辊碎渣机 | | | 干式单辊碎渣机 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 型号 | DGS830-AQH | DGS830-AAW | DGS1230-CQH | GDGS600 | GDGS720 | GDGS900 |
| 处理物料 | 湿渣 | 湿渣 | 湿渣 | 干渣 | 干渣 | 干渣 |
| 出力（t/h） | 60 | 60 | 80 | 15 | 25 | 40 |
| 进料尺寸（mm×mm） | 200×200 | 200×200 | 200×200 | 250×250 | 250×250 | 250×250 |
| 出料尺寸（mm×mm） | 25×25 | 25×25 | 50×50 | 50×50 | 50×50 | 50×50 |
| 电动机功率（kW） | 7.5 | 7.5 | 22 | 15 | 22 | 30 |
| 质量（t） | 2.7 | 3.2 | 5.1 | 3.6 | 4.9 | 7.5 |

3. 设备布置

在电厂干式和湿式除渣系统一般均需配置碎渣机，对于干式除渣系统，碎渣机布置在干式排渣机出口下方。对于湿式除渣系统，碎渣机布置在刮板捞渣机出口下方；刮板捞渣机直接上渣仓湿式除渣系统一般不配置碎渣机。

## 十、布置设计

以下主要介绍机械除渣系统和石子煤机械输送系统的典型布置设计方案。

1. 湿式机械除渣系统

湿式机械除渣系统主要有以下几种布置方式：

（1）刮板捞渣机直接上渣仓方案。该布置方案系统简单、故障点少、积灰和漏水点少，易于保证现场环境卫生。渣仓可为单渣仓或双渣仓，双渣仓存渣量较大，两渣仓轮换排渣可使炉渣脱水时间延长，有利于炉渣的脱水，但布置双渣仓占地面积较大，仓顶需要布置切换设备，也使刮板捞渣机头部高度及刮板捞渣机长度增加。某 600MW 机组刮板捞渣机直接进单渣仓设备布置见图 4-37，某 600MW 机组刮板捞渣机直接进双渣仓设备布置见图 4-38。对于渣量较少的小容量机组也可以实现两台炉刮板捞渣机进一座渣仓，以节约投资和占地。某 2×100MW 机组两台炉刮板捞渣机进一座渣仓设备布置见图 4-39。

（2）刮板捞渣机+碎渣机破碎后进渣沟方案。刮板捞渣机→碎渣机→渣沟→渣浆泵→脱水仓的除渣形式是国内 20 世纪 80 年代最早采用捞渣机除渣时的典型设计，这种设计形式存在的主要缺点是渣脱水后又加水，然后进行脱水的弊端，同时存在渣浆泵、管道磨损快、运行维护费用高等缺点。目前国内新建机组设计已很少采用这种布置方式，但印度、越南等国家还在采用。某 600MW 机组刮板捞渣机+碎渣机破碎后进渣沟系统的布置见图 4-40。

2. 干式机械除渣系统

风冷式干渣机的布置方式主要有：

（1）一级风冷式干渣机+垂直斗式提升机后进渣仓方案。一级风冷式干渣机+垂直斗式提升机后进渣仓，此种布置方式受场地影响较小，便于布置。某 300MW 机组一级风冷式干渣机+斗式提升机进渣仓布置见图 4-41。

（2）一级干渣机直接进渣仓方案。一级风冷式干渣机直接进渣仓，系统简单，设备故障点少。该布置方案要兼顾干渣机倾角的要求，需要足够长的布置场地（或者渣仓容积受到限制）。某 300MW 机组一级干渣机直接进渣仓布置见图 4-42，渣仓可布置为单渣仓或双渣仓，也可以两台炉均采用一级干渣机进同一个渣仓。某 2×300MW 机组两台炉均采用一级干渣机进同一个渣仓布置见图 4-43。

（3）一级干渣机+二级干渣机方案。由于场地布置等原因，需要采用一级干渣机+二级干渣机串联接力的布置方式。两级干渣机的接力布置有两种方式：

1）某 1000MW 机组一级干渣机与二级干渣机沿同一方向水平布置+斗式提升机进渣仓布置，见图 4-44。此种布置方式一般只用于 1000MW 等级机组，原因是锅炉炉膛较宽，而单级干渣机输送长度又有限。

2）某 300MW 机组一级干渣机与二级干渣机垂直布置进渣仓，见图 4-45。

3. 循环流化床锅炉除渣设备

采用冷渣器、链斗输送机和垂直斗式提升机的底渣输送，典型布置见图 4-46。

4. 石子煤机械输送系统

采用振动输送机和垂直斗式提升机的石子煤机械输送系统，典型布置见图 4-47。

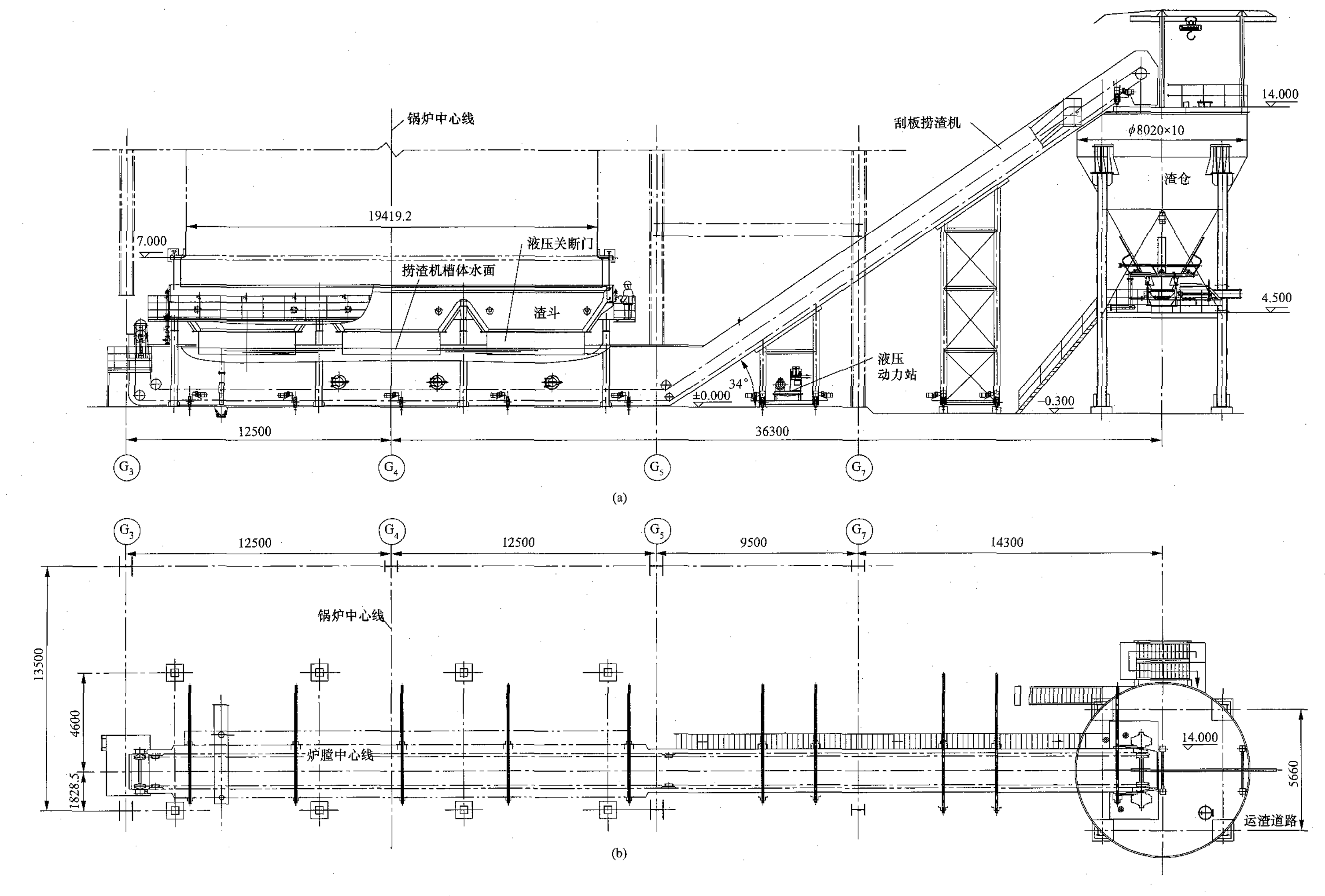



图4-37 某600MW机组刮板捞渣机直接进单渣仓设备布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

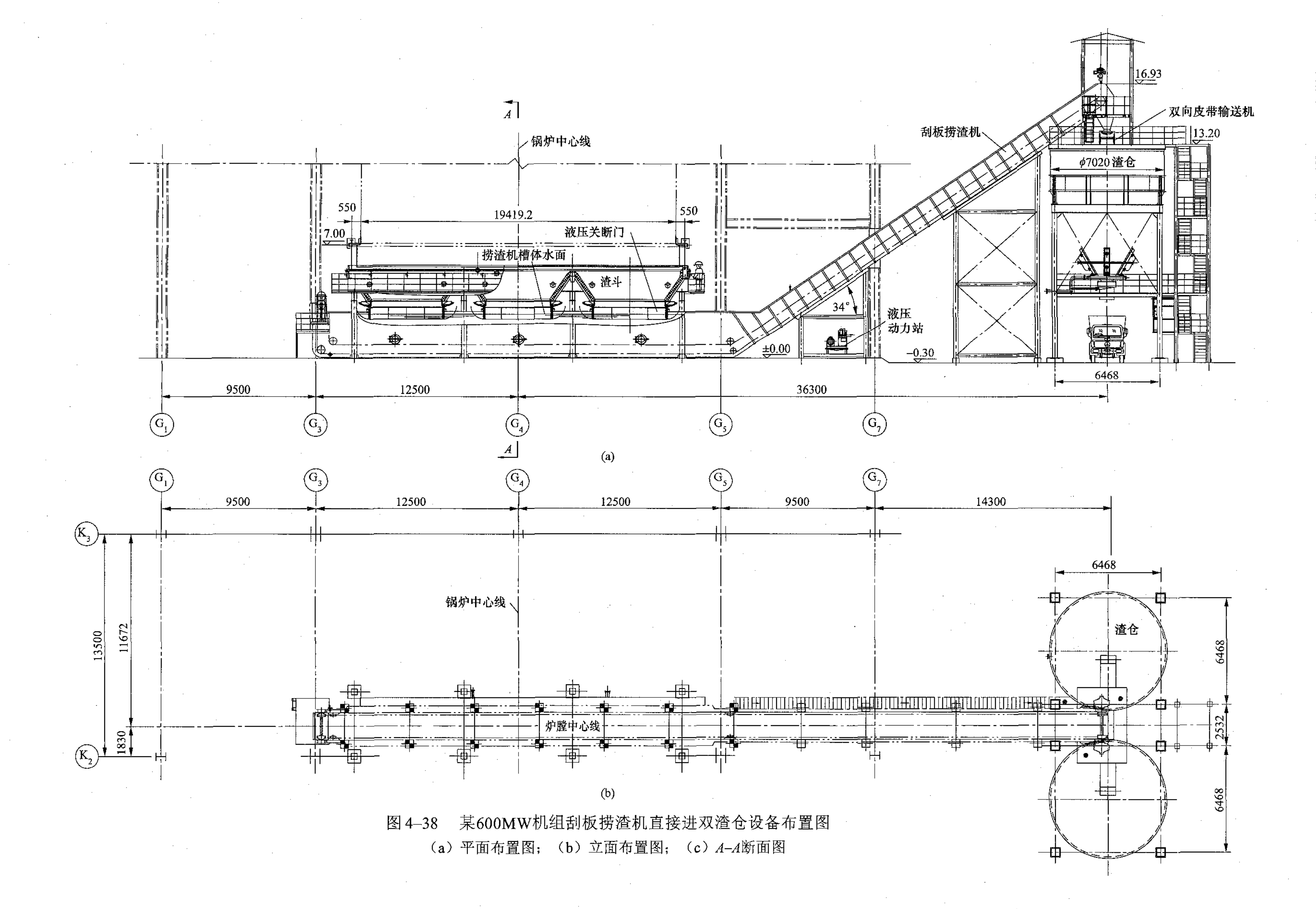



图4–38　某600MW机组刮板捞渣机直接进双渣仓设备布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图；（c）A–A断面图

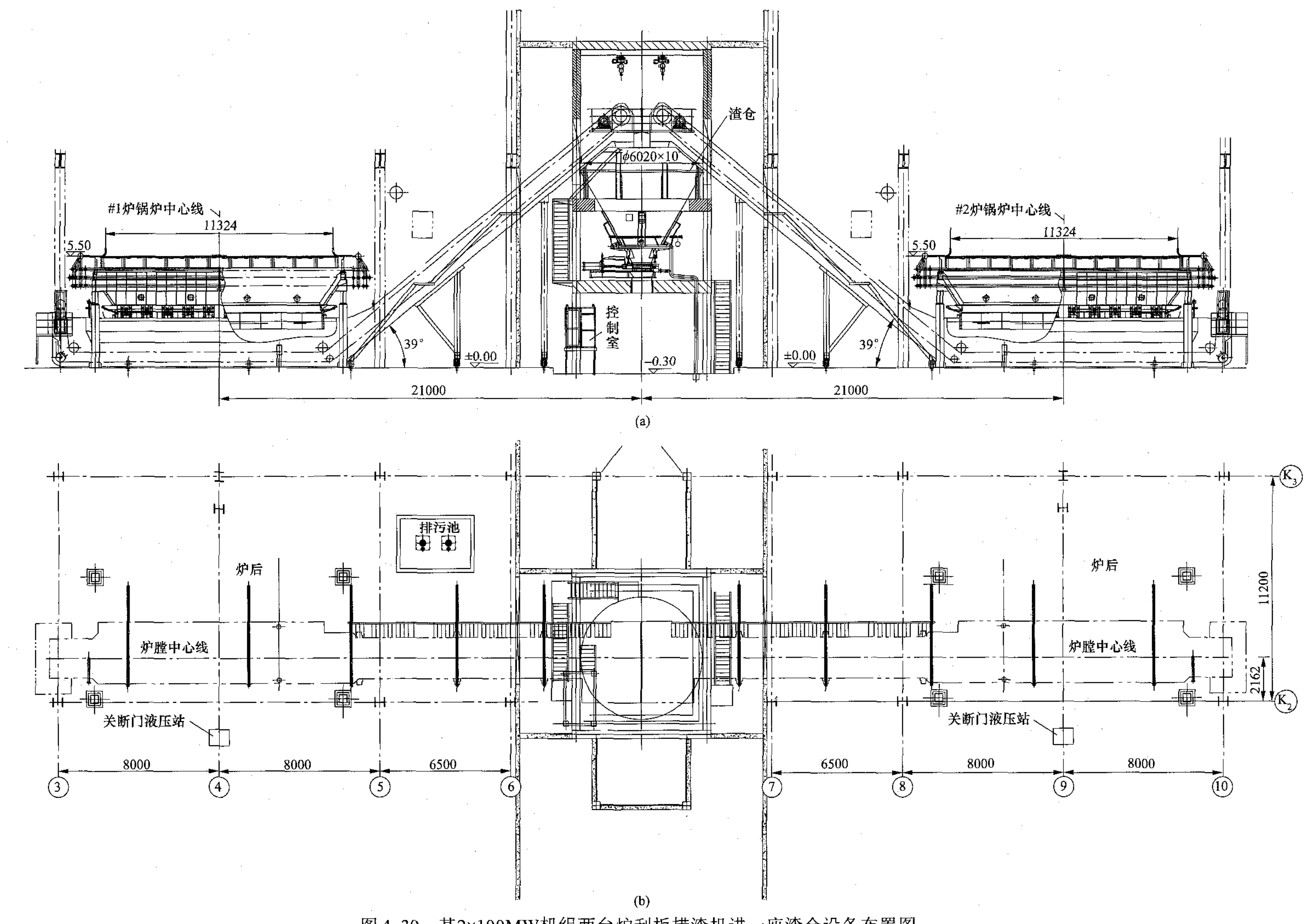



图4-39 某2×100MW机组两台炉刮板捞渣机进一座渣仓设备布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

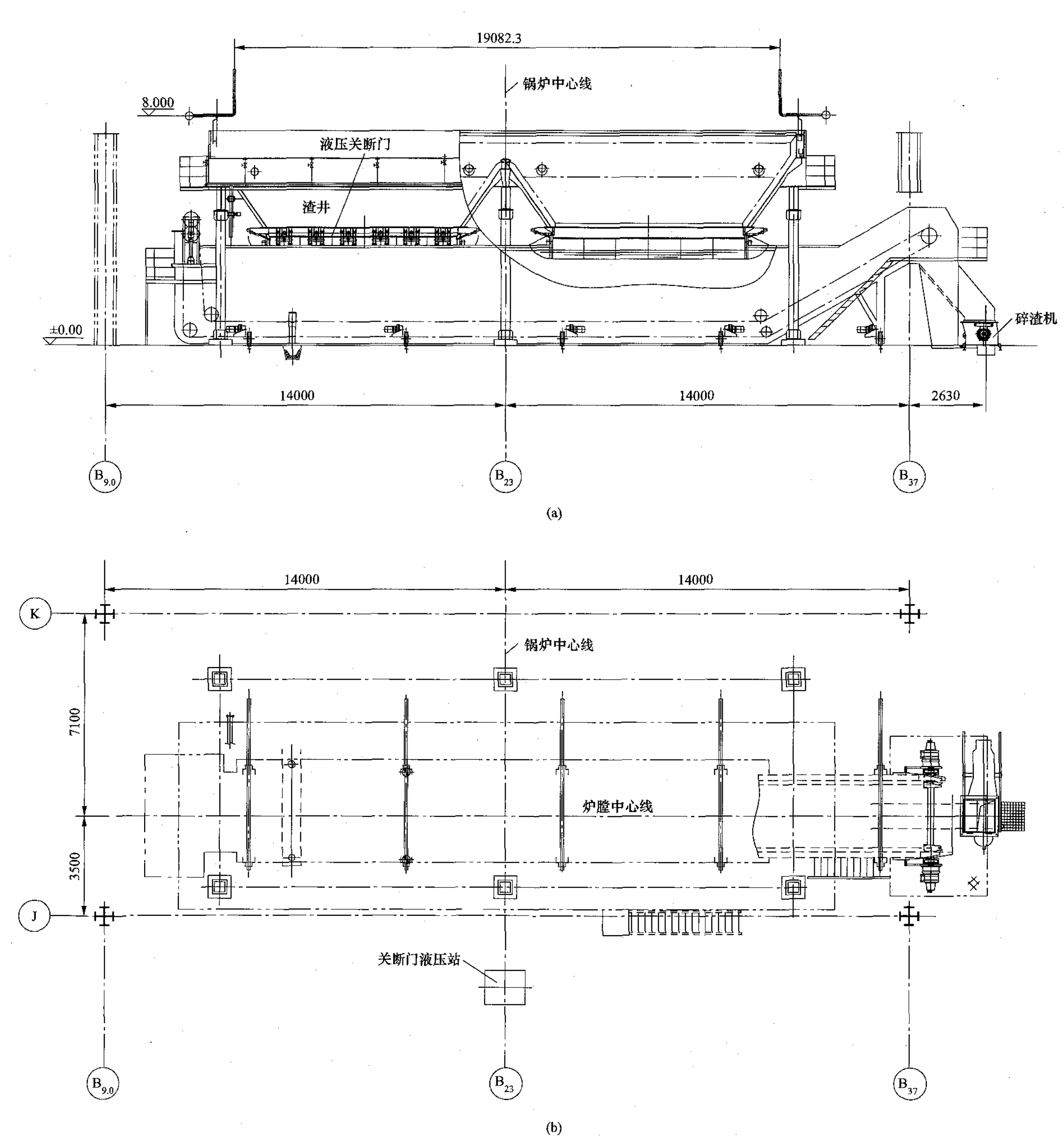



图 4-40　某 600MW 机组刮板捞渣机+碎渣机破碎后进渣沟系统布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

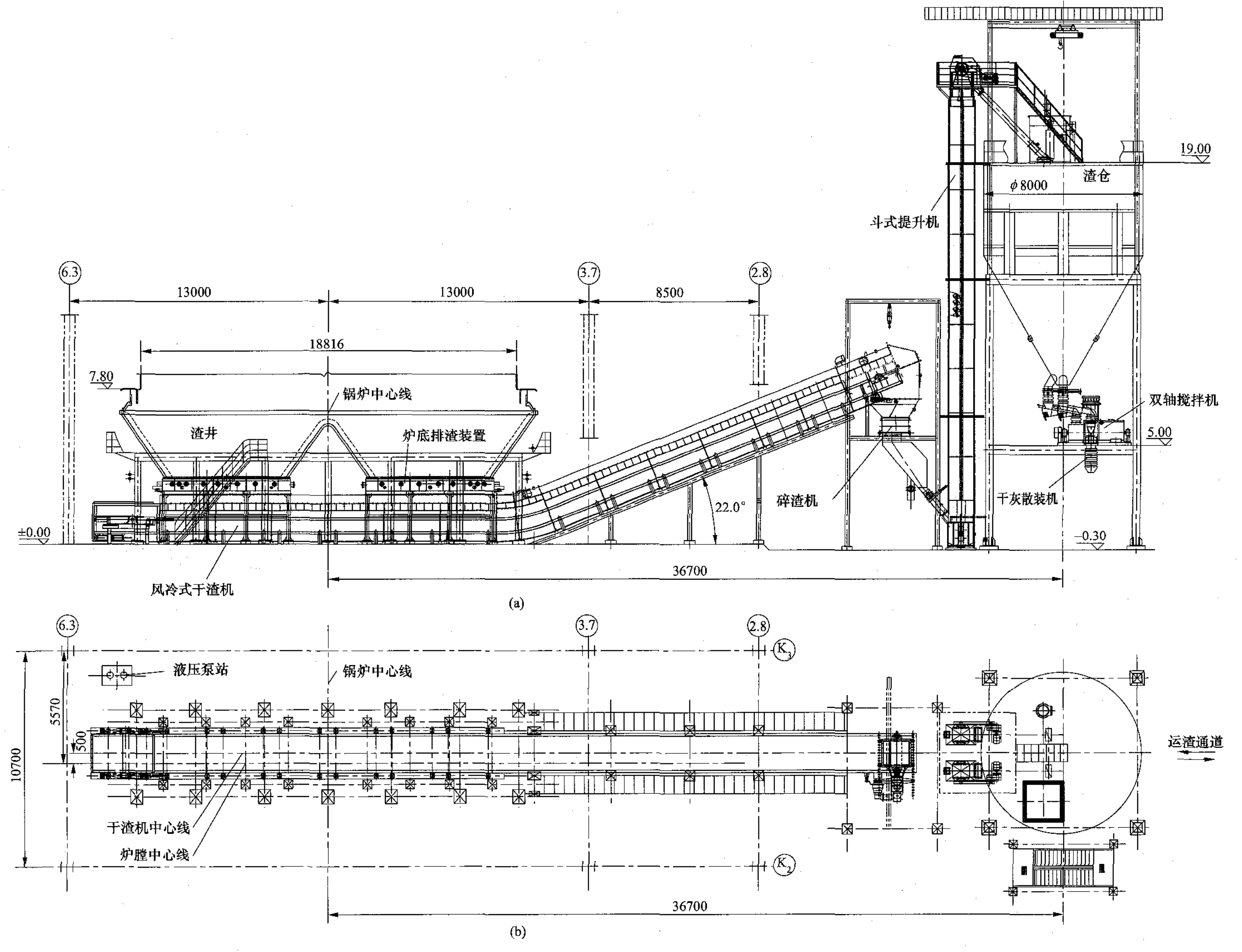



图4-41　某300MW机组一级风冷式干渣机+斗式提升机进渣仓布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

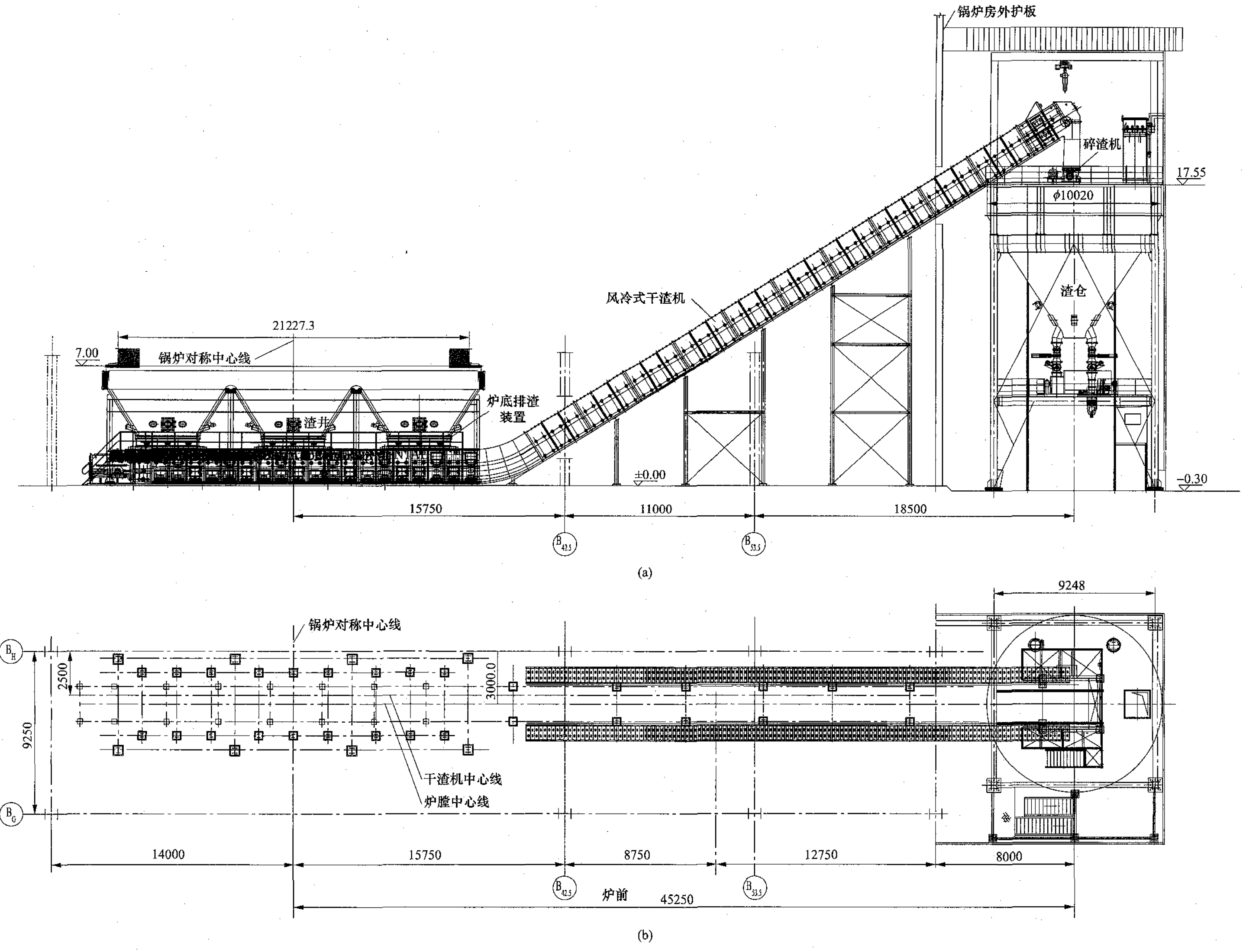



图4–42　某300MW机组一级干渣机直接进渣仓布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

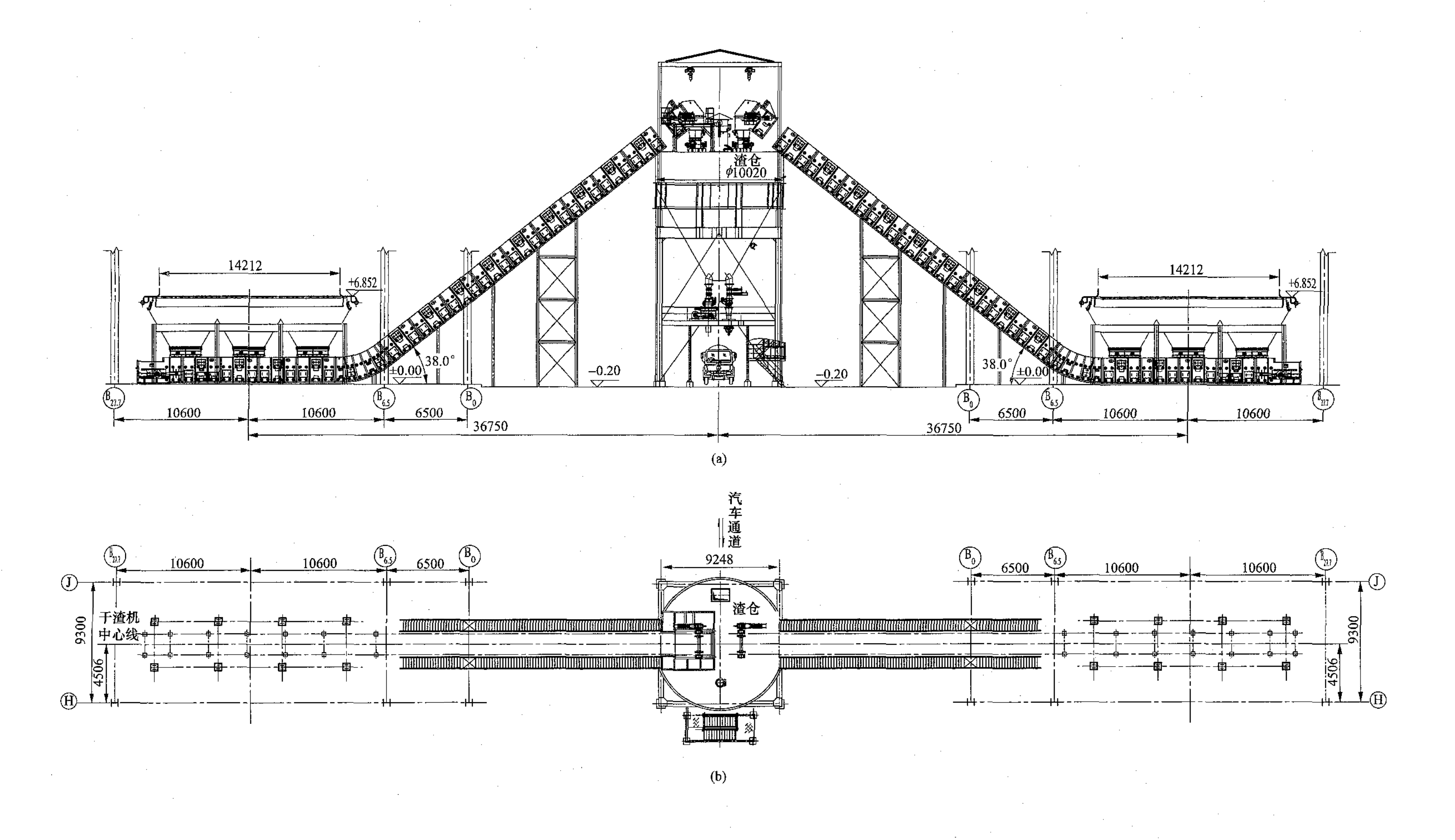



图4-43 某2×300MW机组两台炉均采用一级干渣机进同一个渣仓布置图

（a）平面布置图；（b）立面布置图

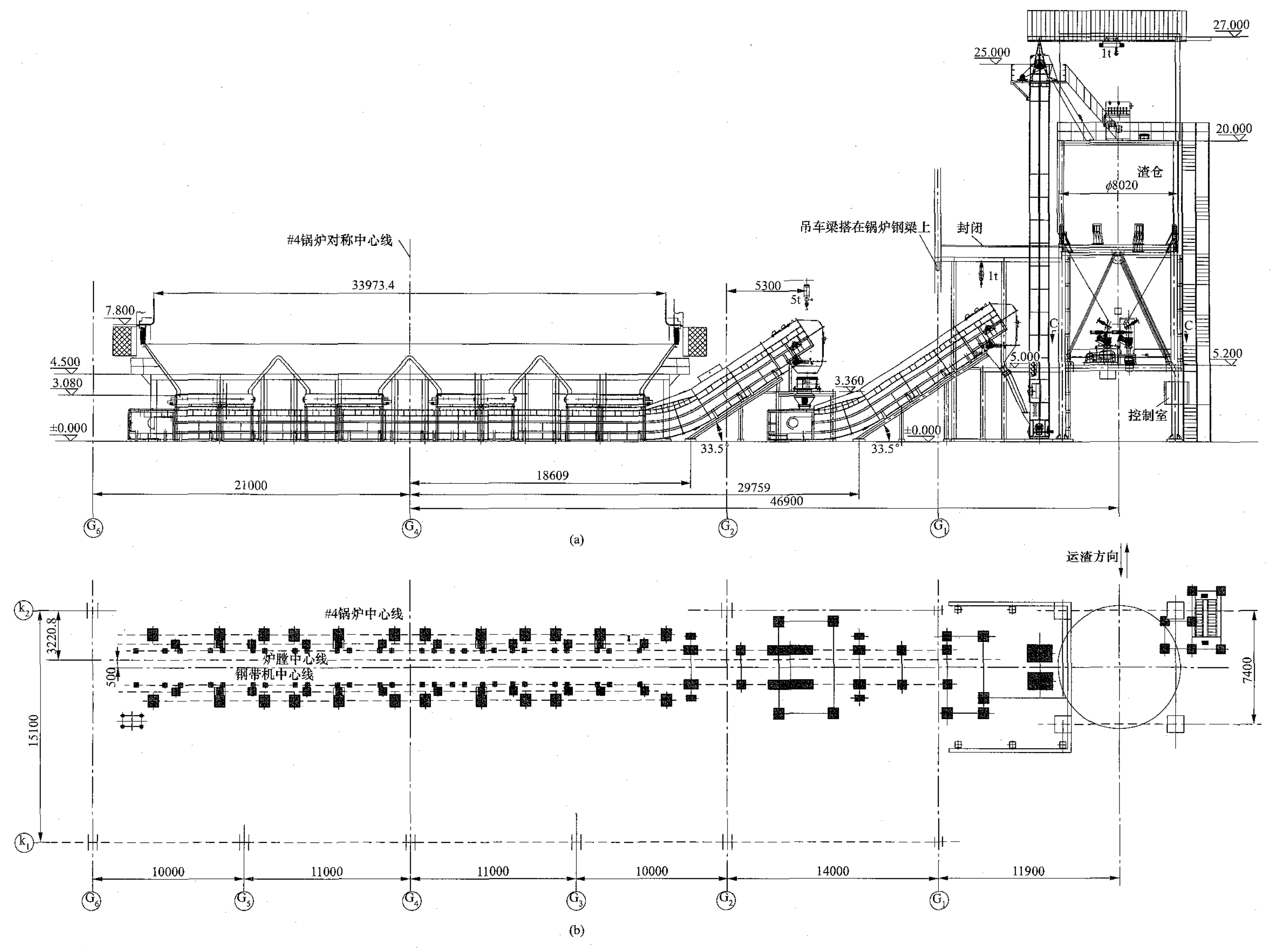



图4–44 某1000MW机组一级干渣机与二级干渣机沿同一方向水平布置+斗式提升机进渣仓布置图

（a）基础图；（b）立面布置图

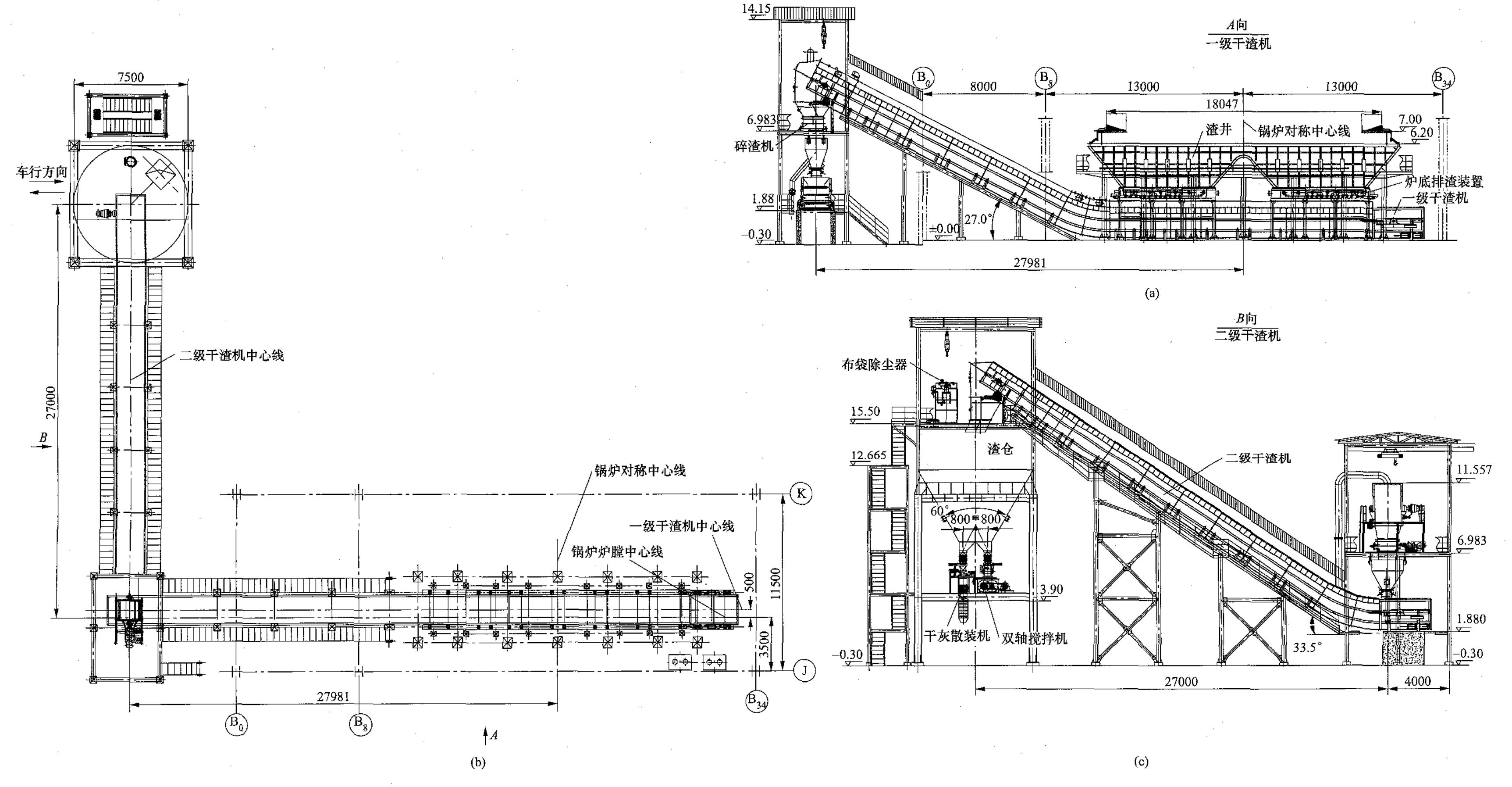



图4–45　某300MW机组一级干渣机与二级干渣机垂直布置进渣仓布置图

（a）A向断面图；（b）平面布置图；（c）B向断面图

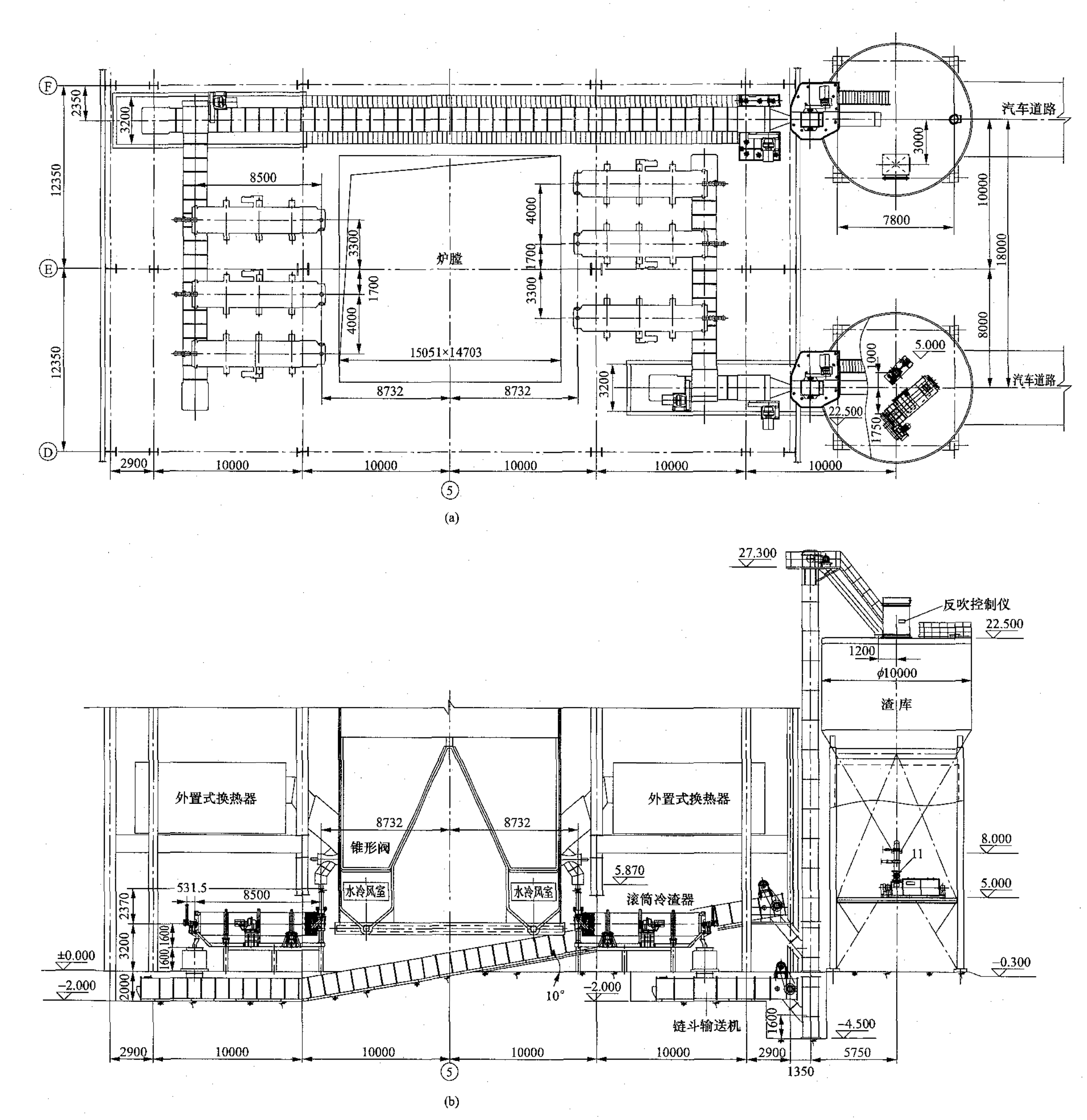



图 4-46　机械式锅炉底渣系统设备典型布置图

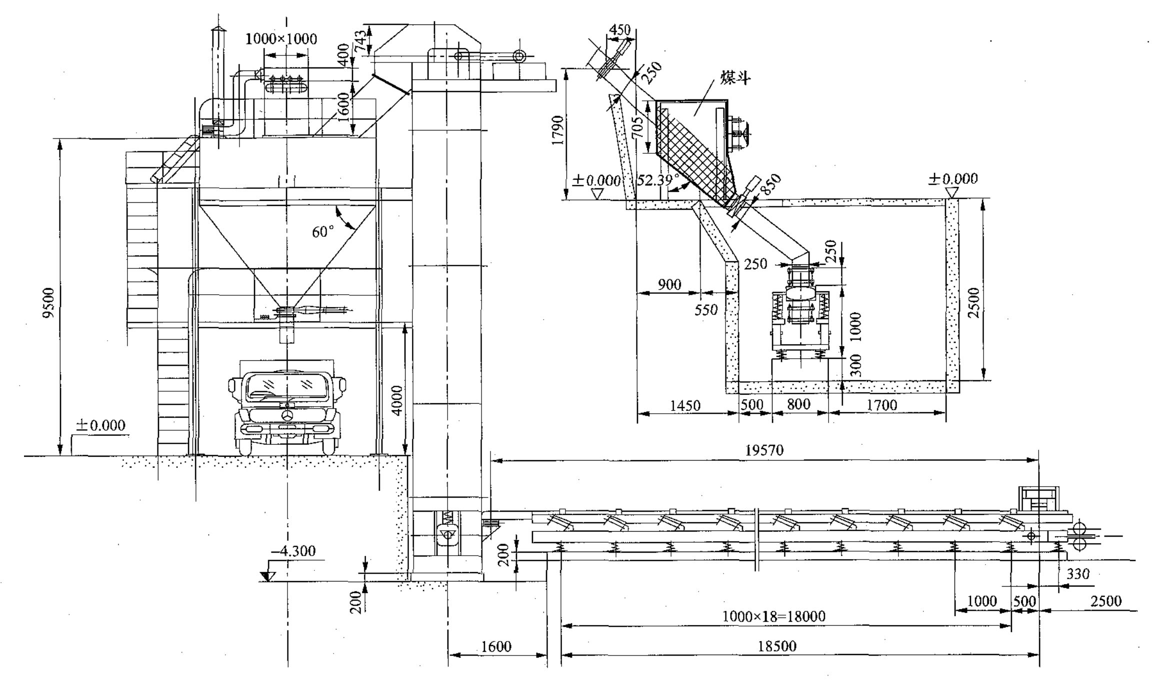



图 4-47 石子煤机械输送设备布置图

## 第三节 厂 外 输 送 设 备

厂外除灰渣机械输送系统宜采用汽车运输，也可采用带式输送机和船舶运输，或者组合输送方式。

### 一、汽车运输

目前国内多数电厂的厂外灰渣运输方式都采用汽车运输，将飞灰和底渣直接输送至综合利用用户处或者灰场。汽车运输灵活，适应能力强，运输效率高，尤其适合于灰渣综合利用用户点较分散的场合。

1. 设计要求

（1）火力发电厂采用汽车外运灰渣时，所选用汽车应与厂内、外的道路、桥涵和贮灰场条件相适应。

（2）调湿灰渣外运应采用调湿灰专用自卸汽车，并采取有效的抑尘和防遗撒措施；干灰外运可采用密封自卸罐车。

（3）采用汽车运输灰渣时，宜设有汽车冲洗设施。

（4）当电厂自备运灰渣车辆数量较多时，宜设汽车维修间、调度值班室及必要的清洁卫生设施。

（5）运输车辆的车型和数量应根据外运机制、综合利用条件、灰渣特性、道路等统一考虑。

2. 设计计算

（1）汽车选型计算。

1）自卸汽车台班运输能力 $A$ 计算

$$A=\frac{60mtK_1}{t_1} \tag{4-13}$$

式中 $A$——汽车台班能力，t/（台·班）；

$m$——自卸汽车铭牌载重量，t；

$t$——每班法定工作时间，h，一班制可取 6.5～7.0h；两班制可取 6.0～6.5h；

$K_1$——自卸汽车的载重利用系数，见式（4-14）；

$t_1$——自卸汽车周转一次所需时间，min，见式（4-15）。

2）自卸汽车的载重利用系数

$$K_1=\frac{V\rho_{hz}\psi}{m} \tag{4-14}$$

式中 $V$——车箱容积，$m^3$；

$\rho_{hz}$——灰渣堆积密度，$t/m^3$，查阅附录 B 选取；

$\psi$——车箱充满系数，可取 0.80～0.90。

3）自卸汽车周转一次所需时间

$$t_1=t_z+t_y+t_x+t_d \tag{4-15}$$

式中 $t_z$——装满一车所需时间，min，见式（4-16）；

$t_y$——运送一车所需时间，min，见式（4-17）；

$t_x$——卸料时间与物料特性、载重量有关，一般按 3～5min；

$t_d$——汽车调车及等待停歇时间，与装卸场地、车型有关，宜按 2～4min。

4）自卸汽车装满一车所需时间

$$t_z=\frac{60V\psi}{G}+1 \tag{4-16}$$

式中 $G$——卸料设备出力，t/h；

1——1min，考虑卸料设备装车时启动滞后时间。

5）自卸汽车运送一次所需时间

$$t_y=\frac{60\times 2L}{v} \tag{4-17}$$

式中 $L$——平均运距，km；

$v$——自卸汽车平均运行速度，km/h，与汽车性能、车型、道路、路况、运距等因素有关，可按表4-24选用。

**表4-24　汽车平均运行速度参考值　（km/h）**

| 道路等级 | 汽车类型载重（t） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ≤7 | 20～10 | ≥25 | ≥40 |
| Ⅰ | 30～26 | 25～22 | 20～18 | 20～18 |
| Ⅱ | 26～24 | 22～20 | 18～16 | 18～16 |
| Ⅲ | 22～20 | 18～16 | 16～14 | 16～14 |

注 1. 当车型小、区间长、弯道少时，速度可取上限或者接近上限；反之，可取下限及接近下限。

2. 当运距小于或等于1km时，上表数值应按下列数值折减：运距小于或等于1km时，乘0.9；运距小于或等于0.5km时，乘0.8。

6）汽车数量计算

$$N=\frac{K_2G_b}{CAK_3} \tag{4-18}$$

式中 $N$——汽车数量，台；

$K_2$——运输不均衡系数1.05～1.15，灰渣取1.05，对运量大的或供应条件稳定的物料取下限，反之取上限；

$K_3$——汽车的出车率，出车率$K_3$的选取，应充分考虑各地汽车检修保养条件差别，作到因地制宜，切合实际。目前各电厂汽车完好率已达80%以上，故出车率选为80%；

$G_b$——每天需运输出的灰渣量，t/d；

$C$——每天工作班数，班/d。

（2）卸料设备装载能力与运行车辆匹配核算。在汽车周转一次时间内，卸料设备能够装车数量与运行车数量应满足

$$N_x\geq N_y$$

式中 $N_x$——在汽车周转一次时间内，卸料设备能够装车的数量，台；

$N_y$——卸料点运行车数量，台。

设计要求：配置的汽车在装车时，排队时间应不超过5min。

（3）汽车运行费用计算。

1）燃料年消耗量

$$g=2.1MHL/(100\times 1000m) \tag{4-19}$$

式中 $M$——年运输量，t；

$L$——平均运输距离，km；

$m$——汽车载重量，t；

$H$——燃料消耗定额，kg/100km，按汽车厂家资料（汽油密度取0.725～0.756t/m$^3$，柴油密度取0.863～0.886t/m$^3$）。

另外，汽车用各种润滑油消耗量按占燃料消耗量的6.8%考虑计费。

2）外胎消耗量

$$n_w=\frac{Ln}{1800} \tag{4-20}$$

式中 $n$——每辆车轮胎个数；

$L$——年运输总距离，km。

3）内胎消耗量

$$n_n=\frac{Ln}{27000} \tag{4-21}$$

式中 $n$——每辆车轮胎个数；

$L$——年运输总距离，km。

（4）运输定员及检修。

1）司机、检修人员、管理人员。司机一般按每车每班1.1人计算。当车数少于5辆时，每车按1.2～1.3人计算；当车数大于5辆时，按每车0.5～0.9人计算；检修和管理人员按司机人数的10%计，但一般不少于2人。

2）检修。各种汽车的保养与修理定额见表4-25。

**表4-25　各种汽车的保养与修理定额**

| 保养和修理名称 | 汽车两次修理之间的行驶公里数 | | 一大修期内维修数 | | 每次停车修理时间 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 汽油车 | 柴油车 | 汽油车 | 柴油车 | 汽油车 | 柴油车 |
| 大修 | 70000～100000 | 50000～70000 | 1 | 1 | 30～40 | 35～45 |
| 中修 | 30000～50000 | 25000～30000 | 1 | 1 | 15～20 | 20～25 |
| 二级保养 | 5000 | 4000 | 12～16 | 14～16 | 60 | 120 |
| 一级保养 | 2000 | 1000 | 36～48 | 42～48 | 25 | 40 |
| 事故修理 | | | / | | 40 | 40 |

注 1. 大修是将汽车拆散为各个零件和组合件，将有故障的零件更换，检修其有缺陷的零件。

2. 中修包括修理发动机、离合器，变速箱和后桥。

3. 小修是消除弹簧、车身、驾驶室、电气装备及其他机构的故障，并更换有缺陷的零件。

4. 保养分为例行保养、一级保养和二级保养。

例行保养（每月保养）主要包括刷洗加润滑油及检查和清除所发现的故障等；一级保养是进行整个汽车的外部检查和紧固，对发动机、底盘和电气部分机件进行必要的检查和调整，以及润滑各部机件等；二级保养是在达到所规定的行驶里程后，停止对全部机构件进行检查和紧固，以及各项总成和组件的检验和调整，并消除所发现的故障，清洗滑动和润滑机件。

（5）汽车库。目前很多采用汽车运输灰渣的电厂，在电厂实际运行过程中一般都是采用社会运输力量。社会运输力量形式较多，如电厂下属三产公司、社会运输车队、综合利用单位自备运输工具等。电厂自行购买车辆厂外运输灰渣的较少，所以厂内一般很少设置运灰车库。

对偏远地区电厂自备运输灰渣车辆时，可自行设置汽车库、检修厂等必要辅助设施。

3. 汽车选型

（1）汽车选型原则。

1）汽车运输的配置宜结合综合利用现状并尽量利用社会运力解决。当综合利用量及社会运力落实时，运输汽车的数量可适当核减。

2）汽车运输要与装卸料设施密切配合，提高装卸能力，减少转运时间；要提倡和加强环保意识，充分考虑粉尘污染问题，选用专用密封车，即干灰选用专用密封罐车，湿灰选用带顶盖的专用箱式车；湿渣运输宜采用加高车厢的专用密封自卸汽车，当灰中 CaO 含量大于 10%时，车厢应配带刮板清扫装置；严寒地区应采用尾气伴热。在装卸区域要充分考虑防尘措施，装卸过程避免卸料洒落等造成二次污染。

3）运灰渣汽车选型根据灰、渣库通行能力、场内外运灰道路实际承载能力确定，也可根据需要建设专用运灰渣道路；应根据灰渣运输量、物料特性、环保要求、装车要求及国家相关规定确定车型，宜优先选用载重量为 30～50t 的专用汽车，在外运道路满足要求的情况下，也可选择 50t 以上的专用汽车。一般来讲汽车运输距离不宜过长，最好不大于 15km，且运输汽车的数量不宜过多。

（2）运灰渣汽车主要技术参数。常用粉煤灰及底渣运输箱式卡（罐）车主要技术参数见表 4-26。

**表 4-26　粉煤灰及底渣运输箱式卡（罐）车主要技术参数**

| 产品型号名称 | | 自卸汽车 | | | 粉煤灰罐车 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 外形（长×宽×高，m） | | 9×2.5×3.34 | 9.125×2.5×3.41 | 9.98×2.5×3.45 | 11.9×2.5×3.95 | 11.98×2.5×3.85 |
| 货箱（长×宽×高，m） | | 6.1×2.17×1.5 | 6.24×2.17×1.5 | 6.9×2.17×1.5 | 8.35（直段）×$\phi$2.5 | 8.6（直段）×$\phi$2.4 |
| 燃料种类 | | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 | 柴油 |
| 转向形式 | | 方向盘 | 方向盘 | 方向盘 | 方向盘 | 方向盘 |
| 轴数 | | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 轴距（mm） | | 4325+1350 | 4625+1350 | 1800+3600+1350 | 1800+4500+1350 | 1800+4600+1350 |
| 轮胎数 | | 10 | 10 | 12 | 12 | 12 |
| 总质量（kg） | | 25000 | 25000 | 31000 | 31000 | 31000 |
| 额定载重量（kg） | | 12370 | 12500 | 15405 | 13980 | 13460 |
| 整备质量（kg） | | 12500 | 12370 | 15465 | 16890 | 17410 |
| 前悬/后悬（kg） | | 1576/1749 | 1500/1650 | 1576/1650 | 1576/2674 | 1560/2670 |
| 最高车速（km/h） | | 92 | 75 | 77 | 92 | 90 |
| 空气压缩机 | 型号 | — | — | — | OFC-10.0/2 | OFC-10.0/2 |
| | 压力（MPa） | — | — | — | 0.196 | 0.196 |
| | 排量（L/min） | — | — | — | 10000 | 10000 |
| 专用特殊性能参数 | 箱（罐）体容积（$m^3$） | 20 | 20.5 | 22.5 | 36.6 | 33.8 |
| | 车厢举升时间（s） | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | 车厢最大举升角度（°） | 55 | 55 | 55 | — | — |
| | 后盖开启角度（°） | 135 | 135 | 135 | — | — |
| | 液压系统压（MPa） | 16 | 16 | 16 | — | — |

## 二、带式输送机运输

带式输送机是一种利用连续而具有挠性的输送带不停地运转来输送物料的机械，已成为最重要的散状物料连续输送设备，常用的带式输送机主要有通用带式输送机和圆管带式输送机两种。

1. 通用带式输送机

通用带式输送机是应用最广泛的带式输送机，其他类型的带式输送机都是由通用带式输送机演变而成。通用带式输送机由输送带、驱动装置、传动滚筒、改向滚筒、托辊组、拉紧装置和机架等部分组成，如图 4-48 所示。

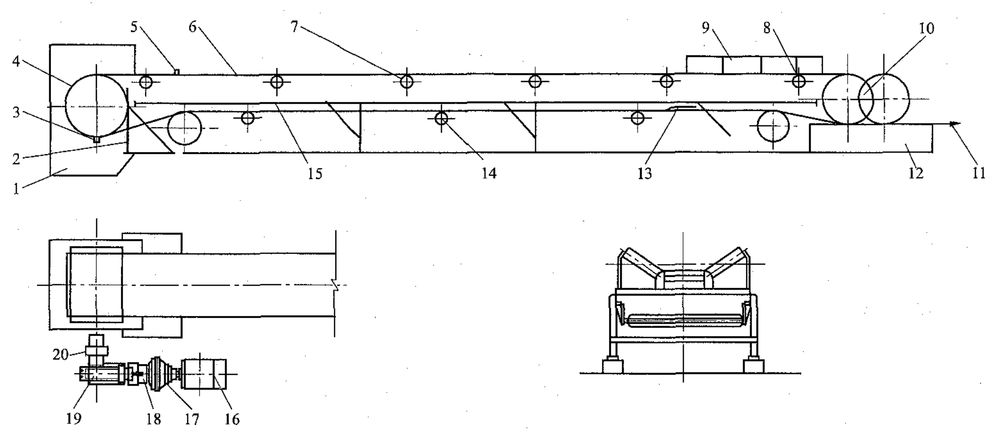



图 4-48 通用带式输送机整机结构

1—头部漏斗；2—头架；3—头部清扫器；4—传动滚筒；5—安全保护装置；6—输送带；7—承载托辊；8—缓冲托辊；9—导料槽；10—改向滚筒；11—螺旋拉紧装置；12—尾架；13—空段清扫器；14—回程托辊；15—中间架；16—电动机；17—液力偶合器；18—制动器；19—减速器；20—联轴器

通用带式输送机具有输送距离长、输送能力大、结构简单、安全可靠，易实现自动控制，检修维护方便，投资和运行费用低等优点；缺点是提升角度有限制，输送路径长，不能转弯，导致系统占地较大。

（1）设计要求。

1）带式输送机设计应满足 GB/T 14784《带式输送机安全规范》的要求。

2）带式输送机的设计应以下列资料为依据：①输送能力；②输送物料的特性；③工作环境；④卸料方式和卸料装置形式；⑤给料点数目和位置；⑥输送机的布置形式和尺寸；⑦电源电压等级；⑧特殊要求。

3）输送灰渣、石子煤的带式输送机应按单路设计，并考虑必要的富裕量，带式输送机根据工程具体气象条件可装设防护罩或采用封闭栈桥，如图 4-49 所示。

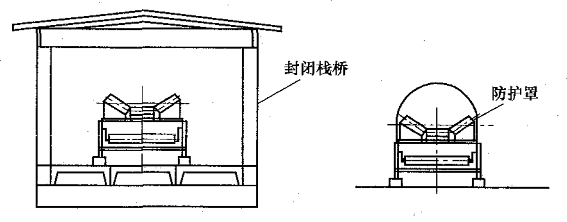



图 4-49 带式输送机栈桥及防护罩

4）带式输送机的工作班制，应与锅炉除灰系统运行相协调，单路宜采用两班工作制。输送量宜不小于电厂灰渣、石子煤最大排放量的 300%。

5）灰渣厂外输送用普通带式输送机，工作环境一般在−15～+40℃之间，要求物料温度不超过 70℃；耐热橡胶带可输送 120℃以下的物料。

6）带式输送机转运站落差应尽量减小。

（2）设计计算。

1）出力计算。通用带式输送机的出力可按式（4-22）计算

$$G = Kb^2 v\rho_s \tag{4-22}$$

式中 $G$——带式输送机的出力，t/h；

$K$——断面系数，可按表 4-27 取值；

$b$——带宽，m；

$v$——传送带的输送速度（简称带速），m/s，带速通常取 1.6～2.5m/s；

$\rho_s$——物料的实际堆积密度，kg/m³。

由多台带式输送机组成的系统，系统额定出力可取带式输送机最大出力的 0.80～0.95 倍。

2）电动机功率计算。

a. 圆周驱动力。带式输送机传动滚筒上所需圆周

表 4-27 断面系数 $K$

| 带宽 $b$（mm） | 500 | 650 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 托辊槽角 $\lambda$（°） | 35 | | | | | | | | |
| 断面系数 $K$ | 340 | 365 | 380 | 400 | 410 | 415 | 420 | 425 | 430 |

注 $K$ 值计算的物料的堆积角 $\theta = 20°$。

驱动力 $F_U$ 是所有运行阻力之和，可按式（4-23）或式（4-24）计算

$$F_U = F_H + F_N + F_{S1} + F_{S2} + F_{ST} \qquad (4\text{-}23)$$

或

$$F_U = CF_H + F_{S1} + F_{S2} + F_{ST} \qquad (4\text{-}24)$$

式中　$F_U$——带式输送机传动滚筒上所需圆周驱动力，N；

$F_H$——主要阻力，N；

$F_N$——附加阻力，N；

$F_{S1}$——主要特种阻力，即托辊前倾摩擦阻力及导料槽摩擦阻力，N；

$F_{S2}$——附加特种阻力，即清扫器、卸料器及翻转回程分支输送带的阻力，N；

$F_{ST}$——倾斜阻力，N；

$C$——与输送带长度有关的系数，可按表 4-28 选取。

对于长度大于 80m 的带式输送机，圆周驱动力可按式（4-24）计算；对于长度小于 80m 的带式输送机，圆周驱动力应按式（4-23）计算。

**表 4-28　　长 度 系 数 *C***

| 输送机长度 *L*（m） | 80 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *C* | 1.92 | 1.78 | 1.58 | 1.45 | 1.31 | 1.25 | 1.20 | 1.17 |
| 输送机长度 *L*（m） | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 5000 |
| *C* | 1.14 | 1.12 | 1.10 | 1.09 | 1.06 | 1.05 | 1.04 | 1.03 |

b. 带式输送机的主要阻力 $F_H$

$$F_H = fLg[q_{RO} + q_{RU} + (2q_B + q_G)\cos\alpha] \qquad (4\text{-}25)$$

式中　$F_H$——主要阻力，N；

$f$——模拟摩擦系数，可按表 4-29 取值；

$L$——输送机长度（头尾滚筒中心距），m；

$g$——重力加速度，取 $g$=9.81m/s²；

$q_{RO}$、$q_{RU}$——输送机承载、回程分支每米托辊旋转部分质量，kg/m；

$q_B$——每米长度输送带质量，kg/m；

$q_G$——每米长度输送物料质量，kg/m；

$\alpha$——输送机在运行方向上的倾斜角，（°）。

**表 4-29　　模 拟 摩 擦 系 数 *f***

| 安装情况 | 工 作 条 件 | *f* |
|---|---|---|
| 水平、向上倾斜及向下倾斜的电动工况 | 工作环境、制造、安装良好，带速低，物料内摩擦系数小 | 0.020 |
| 水平、向上倾斜及向下倾斜的电动工况 | 按标准设计、制造、调试好，物料内摩擦系数中等 | 0.022 |
|  | 多尘、低温、过载、高速度、安装不良，托辊质量差，物料内摩擦系数大 | 0.023～0.03 |
| 向下倾斜 | 设计、制造正常，处于发电工况 | 0.012～0.016 |

c. 带式输送机的主要特种阻力 $F_{S1}$。主要特种阻力 $F_{S1}$ 包括托辊前倾的摩擦阻力 $F_\varepsilon$ 和被输送物料与导料槽挡板间的摩擦阻力 $F_{gl}$ 两部分，按式（4-26）计算

$$F_{S1} = F_\varepsilon + F_{gl} \qquad (4\text{-}26)$$

其中托辊前倾的摩擦阻力 $F_\varepsilon$ 可按式（4-27）计算

$$F_\varepsilon = C_\varepsilon f_0 L_\varepsilon (q_B + q_G) g \cos\alpha \sin\varphi \qquad (4\text{-}27)$$

被输送物料与导料槽挡板间的摩擦阻力 $F_{gl}$ 可按式（4-28）计算

$$F_{gl} = \frac{f_2 G_v^2 \rho_s g l}{v^2 b_1^2} \qquad (4\text{-}28)$$

$$q_G = \frac{m}{3.6v} \qquad (4\text{-}29)$$

式中　$C_\varepsilon$——槽形系数，通常可取 0.43；

$f_0$——托辊和输送带之间的摩擦系数，通常可取 0.3～0.4；

$L_\varepsilon$——装有前倾托辊的输送机长度，m；

$q_B$——每米长度输送带质量，kg/m；

$q_G$——每米长度输送物料质量，kg/m；按式（4-29）计算；

$\varphi$——托辊前倾角度，通常可取 1.5°；

$\alpha$——输送机在运行方向上的倾斜角，（°）；

$f_2$——物料与导料挡板间的摩擦系数，一般取 0.5～0.7；

$G_v$——输送能力，m³/s；

$\rho_s$——物料的实际堆积密度，kg/m³；

$g$——重力加速度，取 $g$=9.81m/s²；

$l$——导料槽挡板长度，m；

$v$——带速，m/s；

$m$——物料输送量，t/h；

$b_1$——导料槽两挡板间的宽度，m，可由表 4-30 中查取。

d. 带式输送机的附加特种阻力 $F_{S2}$。附加特种阻力 $F_{S2}$ 包括输送带清扫器摩擦阻力 $F_r$ 和犁式卸料器摩擦阻力 $F_a$ 等部分，按式（4-30）计算

$$F_{S2} = nF_r + F_a \qquad (4\text{-}30)$$

其中输送带清扫器摩擦阻力 $F_r$ 可按式（4-31）计算

$$F_r = Apf_3 \qquad (4\text{-}31)$$

犁式卸料器摩擦阻力 $F_a$ 可按式（4-32）计算

$$F_a = bk_2 \tag{4-32}$$

式中 $n$——清扫器的个数，包括头部清扫器和空段清扫器；

$A$——一个清扫器与输送带接触的面积，$m^2$，可由表4-30中查取；

$p$——清扫器与输送带之间的压力，一般取 $3\sim10\times10^4 N/m^2$；

$f_3$——清扫器与输送带间的摩擦系数，一般取0.5～0.7；

$k_2$——刮板系数，一般取1500N/m。

**表4-30　导料槽挡板内宽，刮板与输送带接触面积**

| 带宽 $b$（mm） | 导料槽挡板内宽 $b_1$（m） | 刮板与输送带接触面积 $A$（$m^2$） | |
|---|---|---|---|
| | | 头部清扫器 | 空段清扫器 |
| 500 | 0.315 | 0.005 | 0.008 |
| 650 | 0.4 | 0.007 | 0.01 |
| 800 | 0.495 | 0.008 | 0.012 |
| 1000 | 0.61 | 0.01 | 0.015 |
| 1200 | 0.73 | 0.012 | 0.018 |
| 1400 | 0.85 | 0.014 | 0.021 |
| 1600 | 1.1 | 0.016 | 0.032 |
| 1800 | 1.25 | 0.018 | 0.036 |
| 2000 | 1.4 | 0.02 | 0.04 |
| 2200 | 1.6 | 0.022 | 0.044 |
| 2400 | 1.8 | 0.024 | 0.048 |

e. 倾斜阻力 $F_{ST}$。按式（4-33）计算

$$F_{ST} = q_G Hg \tag{4-33}$$

式中 $F_{ST}$——倾斜阻力，N；

$q_G$——每米长度输送物料质量，kg/m；

$H$——输送机受料点与卸料点之间的高差，m；

$g$——重力加速度，取 $g$=9.81m/s²。

f. 传动滚筒所需运行功率。按式（4-34）计算

$$P_A = \frac{F_U v}{1000} \tag{4-34}$$

式中 $P_A$——传动滚筒所需运行功率，kW；

$F_U$——圆周驱动力，N；

$v$——带速，m/s。

g. 电动机功率。按式（4-35）计算

$$P_M = \frac{KP_A}{\eta} \tag{4-35}$$

式中 $K$——重载启动和功率储备系数，对于倾角不小于5°的上运输送机可取1.15～1.3，对于水平或倾角小于5°的上运输送机，传动滚筒运行功率大于37kW并配置液力偶合器时可取1.15～1.20，传动滚筒运行功率 $P_A$ 不大于37kW并配置弹性联轴器时可取1.15～1.40，带速较高、倾角较小、功率较大的可取较大值；

$\eta$——传动效率，按表4-31选取。

**表4-31　驱动装置的传动效率**

| 驱动方式 | $\eta$ |
|---|---|
| 单驱动，配弹性联轴器 | 0.90 |
| 单驱动，配限矩型液力偶合器 | 0.86 |
| 双驱动，笼式电动机配限矩型液力偶合器 | 0.80 |

h. $L$<80m 的带式输送机的功率计算。对于 $L$<80m的带式输送机，实在无条件直接计算出 $F_U$ 时，可采用经验式（4-36）进行简易计算，也可采用张力逐点计算，即

$$P_a = (k_1 L_n v + k_2 L_n G \pm 0.00273GH)k_3 k_4 + \sum P' \tag{4-36}$$

式中 $k_1L_nv$——输送带托辊转动部分运转功率，kW；

$k_2L_nG$——物料水平运输功率，kW；

$0.00273GH$——物料垂直提升功率，kW，物料向上输送时取“+”值，物料向下输送时取“-”值；

$L_n$——输送机水平投影长度，m；

$H$——输送机受料点与卸料点间的高差，m；

$k_1$——空载运行系数，可根据托辊摩擦阻力系数 $\lambda'$（见表4-32），按表4-33选取；

$k_2$——物料水平运行功率系数，可根据托辊摩擦阻力系数 $\lambda'$（见表4-32），按表4-34选取；

$k_3$——附加功率系数，根据输送机水平投影长度 $L_n$ 和输送机倾角 $\alpha$，按表4-35选取；

$k_4$——卸料车功率系数，无卸料车时 $k_4$=1，有卸料车时，光面滚筒 $k_4$=1.16，胶面滚筒 $k_4$=1.11；

$P'$——犁式卸料器及导料槽长度超过3m部分的附加功率，kW，按表4-36选取。

**表4-32　托辊摩擦阻力系数 $\lambda'$**

| 工作条件 | 槽形托辊摩擦阻力系数 $\lambda'$ | 平形托辊摩擦阻力系数 $\lambda'$ |
|---|---|---|
| 清洁、干燥 | 0.020 | 0.018 |
| 少量尘埃、正常温度 | 0.030 | 0.025 |
| 大量尘埃、湿度大 | 0.040 | 0.035 |

表 4-33 空载功率系数 $k_1$

| $\lambda'$ | 输送机带宽 $b$（mm） | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 500 | 650 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| | 空载功率系数 $k_1$ | | | | | | | | |
| 0.018 | 0.0061 | 0.0074 | 0.0100 | 0.0138 | 0.0191 | 0.0230 | 0.0257 | 0.0308 | 0.0329 |
| 0.020 | 0.0067 | 0.0082 | 0.0110 | 0.0153 | 0.0212 | 0.0255 | 0.0286 | 0.0342 | 0.0366 |
| 0.025 | 0.0084 | 0.0103 | 0.0137 | 0.0191 | 0.0265 | 0.0319 | 0.0358 | 0.0428 | 0.0458 |
| 0.030 | 0.0100 | 0.0124 | 0.0165 | 0.0229 | 0.0318 | 0.0383 | 0.0430 | 0.0514 | 0.0550 |
| 0.035 | 0.0117 | 0.0144 | 0.0192 | 0.0268 | 0.0371 | 0.0446 | 0.0502 | 0.0600 | 0.0642 |
| 0.040 | 0.0134 | 0.0165 | 0.0220 | 0.0306 | 0.0424 | 0.0510 | 0.0572 | 0.0684 | 0.0732 |

表 4-34 物料水平运行功率系数 $k_2$

| $\lambda'$ | 0.018 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_2$ | $4.91\times10^{-5}$ | $5.45\times10^{-5}$ | $6.82\times10^{-5}$ | $8.17\times10^{-5}$ | $9.55\times10^{-5}$ | $10.89\times10^{-5}$ |

表 4-35 附 加 功 率 系 数 $k_3$

| $\alpha$（°） | 输送机水平投影长度 $L_n$（m） | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 | 30 | 45 | 60 | 100 | 150 | 200 | 300 | ＞300 |
| | 附加功率系数 $k_3$ | | | | | | | | |
| 0° | 2.80 | 2.10 | 1.80 | 1.60 | 1.55 | 1.50 | 1.40 | 1.30 | 1.20 |
| 6° | 1.70 | 1.40 | 1.30 | 1.25 | 1.25 | 1.20 | 1.20 | 1.15 | 1.15 |
| 12° | 1.45 | 1.25 | 1.25 | 1.20 | 1.20 | 1.15 | 1.15 | 1.14 | 1.14 |
| 20° | 1.30 | 1.20 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.13 | 1.13 | 1.10 | 1.10 |

注 $k_3$是在考虑有一个空段清扫器、一个头部清扫器及一个 3m 长的导料槽，并考虑物料加速阻力等因素的情况下求出来的。

表 4-36 犁式卸料器及导料槽长度超过 3m 部分的附加功率 $P'$

| 带宽 $b$（mm） | | 500 | 650 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P'$（kW） | 犁式卸料器 | $0.3n$ | $0.4n$ | $0.5n$ | $1.0n$ | $1.4n$ | — | — | — | — |
| | 导料槽 | $0.08L$ | $0.08L$ | $0.09L$ | $0.10L$ | $0.115L$ | $0.18L$ | — | — | — |

注 $n$ 是犁式卸料器个数，$L$ 为导料槽超过 3m 的长度（m），即 $L$ 等于导料槽总长减 3m。

带式输送机的设计和计算，应按照 GB 50431《带式输送机设计规范》、GB/T 17119《连续搬运设备、带承载托辊的带式输送机运行功率和张力计算》和 GB 14784《带式输送机安全规范》的规定进行。

（3）设备选型。

1）产品规格。通用带式输送机以其带宽作为主参数，主要规格见表 4-37。

表 4-37 通用带式输送机规格

| 带宽 $b$（mm） | 500 | 650 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 代码 | 50 | 65 | 85 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 |

2）主要参数。带式输送机的主要参数包括出力 $G$、带速 $v$ 和带宽 $b$，物料最大块度受带宽的限制，带宽与输送物料最大块度的关系按表 4-38 确定；带式输送机的输送带速及其与带宽和出力的关系见表 4-39。

表 4-38 通用带式输送机输送物料的最大块度尺寸 (mm)

| 带宽 $b$ | 物料中大块的含量（质量百分率%） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 500 | 140～90 | 130～80 | 120～70 | 100～50 |
| 650 | 210～110 | 190～100 | 160～90 | 120～65 |
| 800 | 270～130 | 250～120 | 220～110 | 150～80 |
| 1000 | 340～160 | 300～150 | 260～140 | 180～100 |
| 1200 | 390～200 | 350～190 | 300～170 | 220～130 |
| 1400 | 450～230 | 400～220 | 340～200 | 260～150 |
| 1600 | 500～260 | 450～240 | 380～220 | 290～180 |
| 1800 | 550～290 | 480～270 | 420～240 | 320～200 |
| 2000 | 580～320 | 500～300 | 450～260 | 350～230 |
| 2200 | 600～350 | 520～320 | 480～290 | 380～260 |
| 2400 | 620～380 | 500～360 | 500～330 | 410～280 |

注 物料的运行堆积角为20°时选大值，30°时选小值。

表 4-39 带速 $v$、带宽 $b$ 与出力 $G$ 的关系

| 带宽 $b$（mm） | 带速 $v$（m/s） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.8 | 1.0 | 1.25 | 1.6 | 2.0 | 2.5 | 3.15 |
| | 出力 $G$（$m^3/h$） | | | | | | |
| 500 | 69 | 87 | 108 | 139 | 174 | 217 | — |
| 650 | 127 | 159 | 198 | 254 | 318 | 397 | — |
| 800 | 199 | 248 | 310 | 398 | 497 | 621 | 783 |
| 1000 | 324 | 405 | 507 | 649 | 811 | 1014 | 1278 |
| 1200 | — | 594 | 742 | 951 | 1188 | 1485 | 1872 |
| 1400 | — | 825 | 1032 | 1321 | 1651 | 2064 | 2601 |
| 1600 | — | — | | 1720 | 2185 | 2732 | 3442 |
| 1800 | — | — | | 2203 | 2795 | 3493 | 4402 |
| 2000 | — | — | | 2752 | 3467 | 4334 | 5461 |

注 出力 $G$ 值是按水平运输，运行堆积角 $\theta$ 为 20°，托辊槽角 $\gamma$ 为 35° 时计算的，并未考虑带速不同时 $\alpha$ 角可能的变化。

（4）设备布置原则。

1）输送机的出力随其倾角的提高而减小。因而应尽量选用较小倾角，特别对于由多台输送机组成的输送系统（也称输送机线）更是如此。

2）带式输送机的倾斜角$\alpha$，向上倾斜最大倾角不宜大于 16°（寒冷地区露天布置为 14°）；向下倾斜最大倾角为向上倾斜角的 80%。

3）受料段尽量设计为水平段，必须倾斜受料时，其倾角应尽量小，受料段不得设在曲线段内。物料落到输送机的落料点，应是输送带正常成槽的地方，并使导料槽处在一种托辊槽角上，以确保受料顺利，方便导料槽的密封。输送灰渣的带式输送机带速宜低于 2.5m/s。

4）机尾长度是指受料中心线至尾部改向滚筒中心线间的距离，推荐的机尾长度见表 4-40。

表 4-40 推荐的机尾长度 (mm)

| 带宽 $b$ | 机尾长度 $l_0$ |
|---|---|
| 500～650 | 2500 |
| 800～1000 | 3000 |
| 1200～1400 | 3500 |

5）带式输送机凸弧段的曲率半径，应保证槽形输送带通过凸弧段时，输送带中间部分不隆起。弧段最小曲率半径可以按式（4-37）及式（4-38）进行计算

织物芯输送带

$$R_1 \geqslant (38 \sim 42) b \sin\gamma \tag{4-37}$$

钢丝绳芯输送带

$$R_1 \geqslant (100 \sim 167) b \sin\gamma \tag{4-38}$$

式中 $R_1$——凸弧段半径，m；

$b$——带宽，mm；

$\gamma$——托辊槽角，（°）。

凸弧段输送带张力较大时，式中系数应取大值，张力较小时，可取小值。

6）带式输送机凹弧段曲率半径，应保证输送带在空载启动时，输送带不会从托辊上跳起，凹弧段最小曲率半径可按式（4-39）进行计算

$$R_2 \geqslant (1.30 \sim 1.50) F_x / (q_B g) \tag{4-39}$$

式中 $R_2$——凹弧段半径，m；

$F_x$——凹弧段起点处输送带张力，N；

$q_B$——每米长度输送带质量，kg/m；

$g$——重力加速度，取 $g$=9.81m/s²。

7）带式输送机的拉紧装置宜优先采用中部重锤拉紧装置，螺旋拉紧装置一般只用于无法采用其他拉紧方式，且机长小于 50m 的短距离输送机上。长距离带式输送机也可选择电动绞车拉紧装置或液压车式拉紧装置。

8）带式输送机卸料滚筒处应装设头部清扫器，在尾部滚筒前和垂直拉紧装置第一个改向滚筒前均应装设非承载面清扫器。

9）采用短带式输送机时应降低带速，输送带宽度宜放大 1～2 挡。

2. 圆管带式输送机

圆管带式输送机是由多个托辊形成的正多边形托辊组强制将输送带裹成圆管状来输送散装物料的连续输送设备。

圆管带式输送机由输送带、驱动装置、传动滚筒、托辊组、拉紧装置和机架等部分组成，圆管带式输送机与通用带式输送机的主要区别在于输送带和托辊组结构。

圆管带式输送机按结构形式可分为双圆管形（承载、回程分支输送段输送带均采用正多边形托辊组支撑形成圆管状，见图4-50）和单圆管形（仅承载分支输送段以正多边形托辊组支撑形成圆管状）。一般，双圆管带式输送机应用较为普遍。为降低输送廊道宽度，宜优先选用双圆管带式输送机。

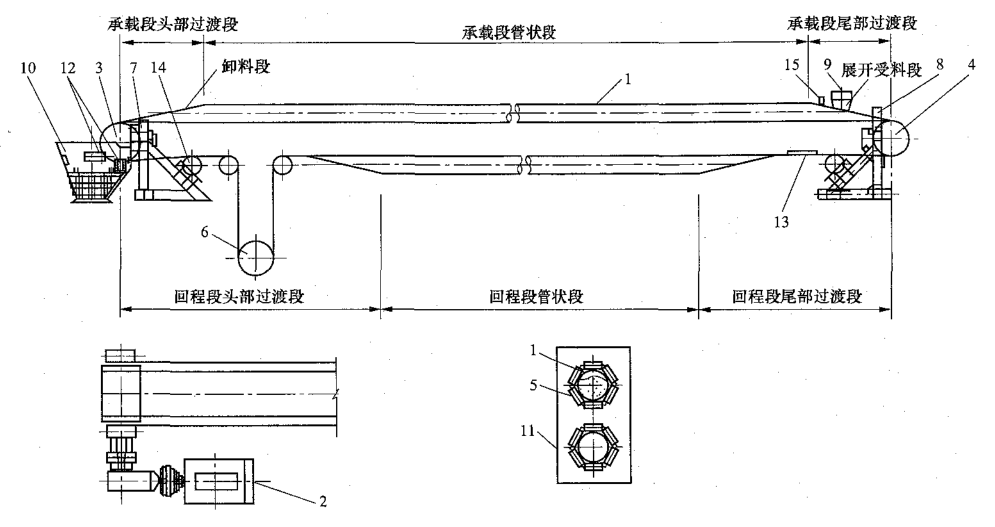



图4-50　圆管带式输送机整机结构

1—管状输送带；2—驱动装置（电动机、减速器、液力偶合器、制动器、联轴器、逆止器）；3—头部滚筒；4—尾部滚筒；5—托辊；6—拉紧装置；7—头架；8—尾架；9—导料槽；10—头部漏斗；11—中部支撑构架；12—头部清扫器；13—空段清扫器；14—改向滚筒；15—限流等辅助设备及保护装置等

（1）圆管带式输送机的优缺点。

1）优点。

a. 输送物料种类广泛。它不但可以输送通用带式输送机可以输送的物料，同时，由于实现了密闭输送，可以较高速度输送轻物料，避免因速度带来的物料飞扬现象，减轻对环境的污染。

b. 输送机栈桥通常采用钢结构，露天布置即可。

c. 输送带容易清扫，因在过渡段输送带反变形，使物料不易黏附在输送带上。

d. 圆管带式输送机可进行水平、垂直及空间弯曲线运行，转弯处无须建立转运环节，因此原来需要多条通用带式输送机搭接的系统可采用一条圆管带式输送机即可，既节省了转运站费用，又简化了系统布置，可有效降低工程造价。

e. 由于形成管状后增大了输送带对物料的摩擦力，可以实现较大倾斜角度的提升。

f. 返回侧也可封闭输送物料。

g. 由于输送带形成管状，在输送同等量的物料前提下管带桁架宽度大约只相当于通用带式输送机横断面的一半，故占地面积小。

2）缺点。

a. 圆管带式输送机除头尾过渡段外，其余托辊均采用六边形布置的六节式托辊，托辊结构相对较复杂，设备隐患多，维修量大。

b. 托辊结构特殊，磨损大，使用寿命较短。

c. 造价高于通用带式输送机，为通用带式输送机的140%～150%。

（2）适用范围。圆管带式输送机适用于输送距离较长，运输路径较复杂，具有较多弯曲段等情况下的物料输送。在上述复杂输送条件下，采用圆管带式输送机方案比通用带式输送机方案有明显的优势。圆管带式输送机输送带从槽形到管状，在其头尾部均需较长的过渡段，因此，对于输送距离较短且是直线输送的带式输送机，采用圆管带式输送机没有优势。

（3）设计要求。

1）圆管带式输送机适宜于较长距离或较复杂路径运输的布置方案。运输距离较短、无特殊要求的简单运输方案宜采用通用带式输送机。

2）圆管带式输送机的地上圆管段宜采用敞开式栈桥。进、出转运站的过渡段部分应采用封闭栈桥或设置防雨罩棚和防风墙。

3）圆管带式输送机适用于环境温度为-25～40℃。

4）圆管带式输送机可适用于物料松散密度为500～2000kg/m³、物料粒度不大于300mm、输送量不大于5000m³/h、输送距离不大于7000m的物料输送。

5）圆管带式输送机宜采用承载、回程分支输送

段输送带均为正多边形托辊组支撑形成的双圆管形结构形式，使物料包围在其中进行密闭输送。

（4）设计计算。

1）出力计算。圆管带式输送机的最大出力可按式（4-40）计算

$$G = 9\times10^{-4}\psi\pi D^2 vk\rho_s \qquad (4\text{-}40)$$

式中 $G$——圆管带式输送机最大出力，t/h；

$v$——带速，m/s；

$\rho_s$——物料的实际堆积密度，kg/m³；

$k$——倾斜带式输送机面积折减系数，通常取0.80～0.95，也可参照GB/T 17119—1997《连续搬运设备带承载托辊的带式输送机运行功率和张力的计算》取值；

$\psi$——物料的充满系数，一般取0.75；

$D$——圆管带式输送机的管径，mm。

由多台圆管带式输送机组成的系统，系统额定出力可取带式输送机最大出力的0.8～0.95倍。

2）电动机功率计算。圆管带式输送机传动滚筒所需运行功率简易计算方法可按通用带式输送机计算方法（按圆管带式输送机展开输送带宽度计算）算出运行功率 $P_{A0}$，由式（4-41）可以估算出圆管带式输送机运行功率

$$P_A = P_{A0}K_1K_2 \qquad (4\text{-}41)$$

式中 $P_A$——圆管带式输送机传动滚筒所需运行功率，kW；

$P_{A0}$——通用带式输送机传动滚筒所需运行功率，kW；

$K_1$——圆管带式输送机弯曲系数，见表4-41；

$K_2$——圆管带式输送机温度系数，见表4-42。

**表4-41　圆管带式输送机弯曲系数 $K_1$**

| 曲线段长度占总机长的百分比（%） | ≤20 | 20～40 | 40～60 | >60 |
|---|---|---|---|---|
| $K_1$ | 1.20 | 1.25 | 1.3 | 1.35 |

**表4-42　圆管带式输送机温度系数 $K_2$**

| 环境最低温度（℃） | ≥-5 | -5～-10 | -10～-15 | -15～-20 | -20～-25 | -25～-30 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_2$ | 1.0 | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.25 |

计算得到传动滚筒轴功率后，可由下式求得电动机功率

$$P_M = KP_A/\eta \qquad (4\text{-}42)$$

式中 $K$——重载启动和功率储备系数，对于倾角不小于5°的上运输送机可取1.15～1.30，对于水平或倾角小于5°的上运输送机，传动滚筒运行功率 $P_A$ 大于37kW并配置液力偶合器时可取1.15～1.20，传动滚筒运行功率不大于37kW并配置弹性联轴器时可取1.15～1.40，带速较高、倾角较小、功率较大的可取较大值；

$\eta$——传动效率，按表4-43选取。

**表4-43　驱动装置的传动效率**

| 驱动方式 | $\eta$ |
|---|---|
| 单驱动，配弹性联轴器 | 0.90 |
| 单驱动，配限矩型液力偶合器 | 0.86 |
| 双驱动，笼式电动机配限矩型液力偶合器 | 0.80 |

（5）设备选型。

1）产品规格。圆管带式输送机常用规格系列见表4-44。

2）主要参数。圆管带式输送机的管径受物料最大块度的限制，管径与输送物料最大块度的关系按表4-45确定。管径、带速与出力的关系可由表4-46查取。

**表4-44　圆管带式输送机常用规格系列**（mm）

| 管径 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 560 | 600 | 630 | 700 | 800 | 850 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 带宽 | 360 | 550 | 730 | 910 | 1100 | 1280 | 1460 | 1640 | 1820 | 2050 | 2190 | 2300 | 2550 | 2900 | 3100 |

**表4-45　圆管带式输送机常用规格对应断面积和许用最大块度**（mm）

| 管径 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 560 | 600 | 630 | 700 | 800 | 850 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 最大块度 | 30～50 | 50～70 | 60～100 | 80～120 | 100～150 | 110～170 | 130～200 | 150～220 | 160～250 | 180～280 | 200～300 | 210～310 | 230～350 | 260～400 | 280～420 |

表 4-46　　　　管径、带速与体积输送量的匹配关系

| 带速（m/s） | 管径（mm） | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 560 | 600 | 630 | 700 | 800 | 850 |
| | 出力（$m^3/h$） | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.8 | 17 | 38 | 68 | 106 | 153 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1.0 | 21 | 48 | 85 | 133 | 191 | 260 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1.25 | 26 | 60 | 106 | 166 | 239 | 325 | 424 | 536 | 663 | — | — | — | — | — | — |
| 1.6 | 34 | 76 | 136 | 212 | 305 | 416 | 543 | 686 | 848 | 1026 | 1221 | 1346 | 1663 | 2162 | 2445 |
| 2.0 | — | 95 | 170 | 265 | 382 | 520 | 679 | 857 | 1060 | 1282 | 1527 | 1683 | 2078 | 2701 | 3055 |
| 2.5 | — | — | 212 | 331 | 477 | 649 | 848 | 1072 | 1325 | 1603 | 1909 | 2104 | 2598 | 3377 | 3819 |
| 3.15 | — | — | — | 417 | 601 | 818 | 1069 | 1350 | 1670 | 2020 | 2405 | 2651 | 3273 | 4255 | 4811 |
| 4.0 | — | — | — | — | — | 1039 | 1357 | 1715 | 2121 | 2566 | 3054 | 3367 | 4156 | 5402 | 6109 |
| 5.0 | — | — | — | — | — | — | 1696 | 2144 | 2651 | 3207 | 3817 | 4208 | 5195 | 6753 | 7636 |

（6）设备布置原则。

1）过渡段设计。圆管带式输送机与通用带式输送机最主要的区别之一是输送带截面需要自头（尾）滚筒的平形状逐渐过渡到圆管状。合理过渡段设计对于圆管带式输送机具有重要意义；过渡段过短，则输送带边缘的附加应力加大，会加速管状输送带的疲劳损坏，降低输送带的使用寿命，同时将使输送带在绕入和绕出滚筒时产生严重跑偏，或者导致在管状段产生扭转，且由此产生的跑偏和扭转现象难以通过现场调整加以根本消除；过渡段设计过长，将缩短整个线路的管状密封段长度。

圆管带式输送机头、尾部过渡段的长度主要取决于输送带允许的伸长率和物料被逐渐卷到圆管范围的要求，过渡直线段的最小长度 $L_s$ 由式（4-43）及式（4-44）确定：

对于尼龙帆布芯或聚酯帆布芯织物输送带

$$L_s \geqslant 30D+2l \tag{4-43}$$

对于钢绳芯输送带

$$L_s \geqslant 50D+2l \tag{4-44}$$

式中 $L_s$——最小过渡直线段长度（从滚筒中心），mm；

$D$——管径，mm；

$l$——管状直线段标准托辊组间距，mm，见表 4-47。

表 4-47　　管状直线段托辊间距表

| 管径(mm) | 物料的实际堆积密度（$t/m^3$） | | |
|---|---|---|---|
| | $\rho_s<0.8$ | $\rho_s=0.8\sim1.6$ | $\rho_s>1.6$ |
| | 托辊间距（mm） | | |
| 100 | 1200 | 1000 | 1000 |
| 150 | 1700 | 1500 | 1300 |
| 200 | 1800 | 1600 | 1500 |
| 250 | 1900 | 1700 | 1600 |
| 300 | 2000 | 1800 | 1700 |
| 350 | 2100 | 1900 | 1800 |
| 400 | 2200 | 2100 | 1900 |
| 450 | 2250 | 2150 | 1950 |
| 500 | 2300 | 2200 | 2000 |
| 560 | 2350 | 2250 | 2050 |
| 600 | 2400 | 2300 | 2200 |
| 630 | 2450 | 2350 | 2250 |
| 700 | 2500 | 2400 | 2300 |
| 800 | 2600 | 2500 | 2400 |
| 850 | 2700 | 2600 | 2500 |

注 1. 圆管曲线段托辊间距可按直线段间距的 60%～80% 考虑。

2. 若采用垂直重锤拉紧，则回程过渡段应从改向滚筒的奔离点或驶入点计算。

2）转弯半径设计。圆管带式输送机的一个突出特点是在管状段可以进行空间转弯。转弯半径的设计应满足下列要求：

a. 采用聚酯帆布芯或尼龙帆布芯输送带的圆管带式输送机最大转弯角度不宜超过 45°，采用钢绳芯输送带的圆管带式输送机最大转弯角度不应超过 45°。

b. 圆管带式输送机转弯半径小于 45°时，转弯最

小曲线半径可按表4-48选取。

表4-48　转弯最小曲线半径　(mm)

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">名称</th><th colspan="2">曲线半径</th></tr>
<tr><th>尼龙芯帆布或聚酯帆布芯输送带</th><th>钢绳芯输送带</th></tr>
<tr><td colspan="2">水平曲线</td><td>D×300</td><td>D×700</td></tr>
<tr><td colspan="2">S形曲线</td><td>D×400</td><td>D×800</td></tr>
<tr><td colspan="2">凹弧曲线</td><td>D×300</td><td>D×700</td></tr>
<tr><td colspan="2">凸弧曲线</td><td>D×400</td><td>D×800</td></tr>
<tr><td rowspan="2">空间曲线</td><td>水平曲线+凹曲线</td><td>D×400</td><td>D×800</td></tr>
<tr><td>水平曲线+凸曲线</td><td>D×500</td><td>D×900</td></tr>
</table>

3）最大倾角设计。圆管带式输送机头、尾过渡段的最大倾斜角度应按通用带式输送机的相同原则设计。圆管带式输送机管状段的最大倾斜角度不宜大于27°。

4）弯曲线之间的连接段设计。

a. 凹曲线与凸曲线之间应由直线段连接，采用聚酯帆布芯或尼龙帆布芯输送带时，直线段的最小长度不应小于50*D*，采用钢绳芯输送带时，直线段的最小长度不应小于100*D*。

b. 水平布置带的S形曲线，若曲线之间无直线段连接，则连接点应为两圆的切点。

5）其他要求。

a. 当圆管带式输送机具有较多的弯曲段输送线路布置时，弯曲段的数量和方向宜在输送机两侧对称布置。

b. 圆管带式输送机不宜采用中部驱动，拉紧装置宜布置在头尾展开段。

c. 圆管带式输送机加料点应设置控制加料量的调节闸门。

## 三、船舶运输

水路运输与陆路运输相比不足之点在于受地理条件限制明显，同时还受航道水位变化影响，在某些地区还受季节性影响，其次是运输速度较慢，因此采用水路运输方式时，必须考虑航道通航的可靠性和安全性。

水路船舶外运灰渣是一种极具区域特色的外运灰渣方式，具有运输量大、投资少、运输成本低等优点。内河船舶运输的运费为铁路运费的30%～60%，为公路运费的30%～40%，海运船舶运输运费则更低。因此在有条件采用船舶运输方式的火力发电厂，宜优先考虑船舶运输灰渣的厂外运输方案。

船舶运输在装卸灰渣过程中易产生扬尘，在系统拟定时应结合当地政策和环保要求，有针对性地研究装船系统及系统中的设备选型。

1. 设计要求

（1）装船设计要求。船舶运输粉煤灰方案宜在火力发电厂就近区域单独设置装灰码头，厂内至码头输灰方式可采用正压浓相气力输送、汽车运输及长距离管式带式输送机输送等多种方案。目前国内已建成的粉煤灰装船系统形式较多，归结为在码头区域设置干灰装船和湿灰装船两大类。干灰装船系统常见的有从厂区采用气力输送系统直接装船和码头设置灰库中转装船两种；湿灰渣装船系统宜采用带式输送机装船方案。外运灰渣码头装船系统的拟定应遵循以下原则：

1）直接装船方式，适合于装灰码头区域不适宜设置灰库的情况。当船型为罐装船时，应将船内乏气引至除尘器过滤；若来船为加盖帆布的散货船，则应配置伸缩式干灰卸料机，以及相应的气固分离、收尘装置。

2）中转装船方式，较成熟的有以下五种：

a. 库底卸料器+倾斜灰管+伸缩式干灰卸料机。

b. 电动给料机+气力助推式溜管+伸缩式干灰卸料机。

c. 电动给料机+空气斜槽+伸缩式干灰卸料机。

d. 电动给料机+螺旋输送机+伸缩式干灰卸料机。

e. 摇臂式装船机，分行走式或固定式两种，配置承料充气箱、计量秤、回转机构、空气斜槽、伸缩式干灰卸料机等。

3）通航条件较好的地区，厂内灰库应尽可能沿江河岸边布置，便于粉煤灰装船。内地江河的潮差相对较小，罐装船或散货船吨位也较小，适合选用助推式溜管、库底卸料器、空气斜槽或螺旋输送机等装船方式。

4）摇臂式装船机适合于沿海地区潮差较大、千吨级以上罐装船或散货船粉煤灰装船，其装船出力宜不小于300t/h。

5）出力在100～200t/h的助推式溜管或库底卸料器装船系统耗气量可按3～5$m^3$/min范围选取。溜管或倾斜灰管的倾角可按不小于8°、空气斜槽可按不小于6°选取。

6）装船各系统应连接严密，保证粉煤灰装船过程中环境清洁。

7）卸灰系统应根据灰处理场条件和灰的物理化学性质确定，可采用机械卸灰方式、气力卸灰方式或水力卸灰方式。

8）湿式粉煤灰可采用大倾角带式输送机卸船装车外运至贮灰场或综合利用用户；密封罐船可采用船载专用气力卸船系统卸船，加盖帆布的散货船干式粉煤灰卸船可采用负压气力式卸船和垂直螺旋卸船两种方案。干灰卸船后可直接送至综合利用用

户或通过中转灰仓装车转运至贮灰场或综合利用用户。垂直螺旋卸船机对码头承载要求也较小，能耗相对较低，但清舱效果不如负压气力卸船机。正压或负压卸船系统气源设备可根据需要布置在到岸码头区域。

9）在不增加码头长度和宽度的前提下，码头内侧可设置装船设备检修间，配备必要的检修设施、工具等。码头引桥、引堤宽度除应保证机械两侧有合理的净空外，还需满足检修车辆通行要求。码头上应设置值班室，并装设与航运部门等处联络的通信设备。

（2）卸船设计要求。采用船舶运输粉煤灰到岸后宜单独建设卸灰码头，也可在原有码头单独隔离一定的区域作为卸灰码头专用。目前国内常用的卸船设备主要有负压气力卸船机和垂直螺旋卸船机两种。

垂直螺旋卸船机主要由门架、转台、水平螺旋、垂直螺旋和喂料器等部分组成，其额定出力为 150～1000t/h 不等。其作业过程在密闭状态下进行，无粉尘污染。垂直螺旋卸船机适宜于小颗粒状、非黏性松散物料，要求被输送物料密度不大于 $1.3t/m^3$，不小于 $0.5t/m^3$。垂直螺旋卸船机不适宜输送块状松散物料、黏性物料及流动性很强的粉料。垂直螺旋卸船机在距船舱底 30～50cm 厚物料层前都能不断地接近满载工作，平均生产率可达到额定出力 70%以上。垂直螺旋卸船机卸船效率高且噪声较小，噪声级可控制在 60dB（A）以下；垂直螺旋卸船机结构简单、质量小，是各种机械式连续卸船机中质量最小的一种，故螺旋卸船机造价相对较低，对码头承载要求也较小；工作构件磨损较严重，垂直螺旋卸船机易损件是各高速轴承，垂直螺旋卸船机年平均维护费可控制在设备总价 2%左右；能耗较小，垂直螺旋卸船机与抓斗卸船机相当，比负压气力卸船机低。

负压气力卸船机是由利用负压风机在管道内形成的负压气流，从船舱内吸卸粉状物料（如水泥、粉煤灰、矿粉等）的机械系统组成，最大出力可达 400t/h，适合于粉状物料和小颗粒状散料。负压气力卸船机结构简单紧凑，船舶清舱方便，能均衡卸料；但单位能耗较高，其能耗系数一般为 0.021～0.038kW·h/（t·m），作业时噪声较大，负压气力卸船机的易损件是布袋和阀门、管道等，年平均维护费为设备总价的 5%～10%。

对于敞篷灰驳上覆盖帆布的散装船，遇到下雨天，无论是气力卸船机还是垂直螺旋卸船机均无法作业；而罐装灰驳则可通过船上自卸系统或经岸上压缩空气站加气达到卸灰要求，不受雨天限制。

2. 设计计算

（1）拖轮不宜设备用，其数量宜按式（4-45）计算

$$N=\frac{mK_2L}{m_0N_1\psi K_1vt} \tag{4-45}$$

式中 $N$——拖轮数，艘；

$m$——年运输灰渣量，t；

$L$——平均往返运输距离，km；

$\psi$——运灰驳的充满系数，运灰浆时宜为 0.4，运干灰时宜为 0.7，运调湿灰时，水力卸灰宜为 0.6，机械卸灰方式时宜为 0.9；

$K_1$——拖轮利用系数，可取 0.8；

$K_2$——灰、渣运输不均衡系数，可取 1.2；

$N_1$——同时拖带运灰驳数，艘；

$m_0$——每艘运灰驳载重量，t；

$t$——拖轮每年工作小时数，h；

$v$——拖轮航速，km/h。

（2）运灰驳不宜设备用，其数量宜按式（4-46）计算

$$N_1=\frac{mK_2}{UC} \tag{4-46}$$

式中 $N_1$——运灰驳数，艘；

$U$——运灰驳全年工作天数，应考虑不能通航和不良气候等因素在内；

$C$——运灰驳昼夜生产率，t/昼夜。

（3）运灰驳昼夜生产率 $C$ 宜按式（4-47）计算

$$C=\frac{m\psi t}{\frac{L}{v}+\sum t} \tag{4-47}$$

式中 $t$——运灰驳昼夜工作时间，h；

$\sum t$——装卸灰、渣及靠码头时间总和，h。

（4）卸灰码头泊位长度计算：

1）对于有掩护的河港码头，泊位长度宜按式（4-48）计算

$$L_b=l+2d \tag{4-48}$$

式中 $l$——设计运灰驳长，m；

$d$——富裕长度，m，按表 4-49 选取。

表 4-49 富 裕 长 度 $d$ 值 （m）

| 设计运灰驳长 $l$ | <40 | 41～85 | 86～150 |
|---|---|---|---|
| 富裕长度 $d$ | 5 | 8～10 | 12～15 |

2）同一个码头上设有多个泊位时，其泊位长度应分别按下式计算

端部泊位 $$L_b=l+1.5d \tag{4-49}$$

中间泊位 $$L_b=l+d \tag{4-50}$$

3）对于开敞式码头（即无掩护的码头），其泊位长度宜按下式计算

$$L_b=(1.4\sim1.5)l \tag{4-51}$$

（5）卸灰码头的年通过能力宜按式（4-52）计算

$$m_t=\frac{t_a}{\dfrac{t_z}{24-\sum t}+\dfrac{t_f}{24}}\times\frac{m}{K_2} \qquad (4\text{-}52)$$

$$t_z=m/G \qquad (4\text{-}53)$$

式中 $m$——运灰驳的载重量，t；

$K_2$——来灰、渣不均衡系数，可取 1.2；

$m_t$——一个泊位的年通过能力，t；

$t_a$——泊位年运营天数，d；

$t_z$——卸一驳灰渣所需时间，h；

$G$——运灰驳卸船出力，t/h；

$t_f$——船舶的辅助作业、技术作业及靠离泊时间之和，h，当无统计资料时，部分单项作业时间按表 4-50 选取，船舶靠离泊间隔时间同航道、锚地、泊位前水域及港作方式等条件有关，可取 1～2h；

$\sum t$——昼夜非生产时间之和，h，包括休息、用膳及交接班时间，可根据各河、港实际情况确定，可取 10h。

**表 4-50　部分单项作业时间**

| 项目 | 靠泊 | 离泊 | 开工准备 | 结束 |
|---|---|---|---|---|
| 时间（h） | 0.5 | 0.5～0.75 | 0.75～1.0 | 0.75～1.0 |

3. 船舶选型

目前国内粉煤灰运输船基本上都是改装船舶，基本可分为专用运输船和非专用运输船。所谓专用粉煤灰运输船就是利用普通运输船只改型，在普通运输船船舱载货区域加装了粉煤灰专用罐，形式和公路上的粉煤灰运输罐车基本相当；非专用粉煤灰运输船就是指散货船采用篷布等简易密封方式将船舱部位加以封盖，防止粉煤灰在船运过程中产生扬尘。目前国内粉煤灰运输船的吨位都较大，运输干灰时宜采用专用粉煤灰密封罐船，外运湿灰渣时宜采用敞篷的船只，运输船只装船完毕后用篷布封盖，防止运输过程中扬尘。

4. 码头及装卸设施设计原则

（1）码头位置及形式选择。

1）运灰渣码头是供装卸灰渣岸堤建筑物，包括系船设施、装卸设备、港内交通、船舶供油、供水及消防、救助设施等。码头应设在水位变幅小、河床稳定、水域较宽广、有足够的水深、船舶系靠安全及地质、地形条件良好的河段上。选择码头位置时还应注意施工方便。码头不宜设在靠近易淤积和主流与支流交会处。

2）选择码头位置时，必须征得当地港务监督部门的同意，并取得书面协议。

3）火力发电厂运灰渣码头一般停泊船位不多，占用岸线不长，利用管道或溜槽、带式输送机等设施装卸，故选择顺岸式固定码头、浮码头、靠船墩（桩）是比较合适的。码头形式应根据装卸量大小、船舶类型、航道自然条件、装卸设备及施工技术条件，按照因地制宜、就地取材的原则综合分析比较后确定。

（2）码头相关设施。

1）码头高程是关系生产安全和节约基建投资的关键，应以航道水文资料为主要依据，结合该处地形、地势、使用要求及防洪措施等因素综合分析研究后确定。码头高程一般按不淹没码头工作面为条件来确定，还要考虑设计高水位及船体超高等因素。对于火力发电厂运灰渣码头，高水位频率一般取 1%，内河码头超高值可取 0.5m，以防止由于风或船舶航行等原因引起水面波动浸湿码头工作面。在风大、浪高地区超高值应取 1.5m，以保证在风浪期间码头不被淹没。

2）码头设计水位一般可根据实测的通航期内每日低水位的多年历史保证曲线，选取保证率 95%的水位，并应与所在航道的设计水位相适应。码头设计水深则应能保证标准船舶的安全通过、靠离和装卸作业。

# 第五章

# 气　源　系　统

气源系统是指产生压缩空气或负压真空的系统。火力发电厂的气源系统通常分为空气压缩机和后处理系统，以及回转式风机和真空泵系统两大类。

## 第一节　气源系统基本概念和特性指标

压缩空气系统是指绝对压力大于 0.1MPa 的空气系统，真空系统是指绝对压力低于 0.1MPa 的空气系统。它们均由产生压力或真空的设备、管道和控制系统组成，其功能是制造出满足不同设计要求（流量、压力、品质等）的气体。下面介绍气源系统的基本概念和特性指标。

### 一、压缩空气系统

（1）压缩。空气压缩主要有两种，绝热压缩与等温压缩。绝热压缩是一种气体热量不产生明显传入或传出的压缩过程，需在一个完全隔热的气缸内完成；等温压缩是一种气体保持温度不变的压缩过程。

注：绝热与等温均是理论上的，实际上压缩机的压缩过程是多变压缩，压缩机设计通常按等温压缩设计，尤其是多级压缩设计。

（2）压缩比。压缩比是指压缩机排气和进气的绝对压力之比。

（3）工程标准状态。在温度为 20℃，绝对压力为 0.1MPa，相对水蒸气压力为 0 时的空气状态叫空气的工程标准状态。

（4）吸入状态。压缩机进口的空气状态。

（5）容积流量。容积流量是指在单位时间内空气压缩机吸入一定状态压力条件下空气的流量。

（6）FAD 流量。FAD（free air delivery）即自由空气流量或实际工况的容积流量，是指经过空气压缩机压缩后的空气体积以入气口的自由空气状态来表示。FAD 排气量几乎接近实际出风量而小于实际进口流量。系统应按 FAD 流量来进行设计和相关计算。

（7）机组输入比功率。是指空气压缩机组的输入功率与空气压缩机实际容积流量之比，单位用 kW/（$m^3$/min）表示。

1）空气压缩机比功率。是评价在压缩相同气体、相同排气压力情况下的压缩机性能的一种指标。该参数用以衡量空气压缩机的节能情况。

2）空气压缩机能效限定值。指空气压缩机在规定工况下所允许的最大机组输入比功率值。

空气压缩机的能效等级分为 3 级，其中 1 级能效最高。各类空气压缩机的能效等级均应符合 GB 19153—2009《容积式空气压缩机能效限定值及能效等级》中的规定，可参见附录 F《螺杆空气压缩机能效等级表》。

（8）喘振。是指透平压缩机在流量减少到一定程度时所发生的一种非正常工况下的振动。透平压缩机也叫叶片式压缩机，离心式压缩机是透平式压缩机的一种形式，喘振会严重损害压缩机。

（9）过滤比。指某一尺寸等级的颗粒经过滤器前后的数量之比，用 $\beta_N$ 表示。

（10）露点。是指在恒定压力下湿空气冷却至饱和（所含的未饱和水蒸气变成饱和水蒸气析出水）时的温度，单位用℃表示。

1）压力露点。指在一定压力下的露点。

2）常压露点。指在大气压下的露点。

3）压缩空气在不同露点与压力下对应的空气饱和含湿量可见附录 G。

（11）固体粒子浓度。空气中固体粒子浓度通常用质量浓度表示。质量浓度是指每立方米空气中所含污染物的质量，单位用 mg/$m^3$ 表示。

（12）压缩热。空气压缩机排出的高温压缩空气所含的热量称为压缩热。

（13）压缩空气品质。指压缩空气中水分及油分含量的指标。

根据 GB/T 13277—1991《一般用压缩空气质量等级》，固体粉尘粒子尺寸和浓度等级见表 5-1，水分含量（压力露点）等级见表 5-2，含油量等级见表 5-3。

表 5-1　　压缩空气中固体粒子尺寸和浓度等级

| 等级 | 最大粒子尺寸（μm） | 最大浓度（$mg/m^3$） |
|---|---|---|
| 1 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 1 | 1 |
| 3 | 5 | 5 |
| 4 | 40 | 10 |

表 5-2　　压缩空气压力露点等级表

| 压力露点等级 | 压力露点（℃） |
|---|---|
| 1 | ≤-70 |
| 2 | ≤-40 |
| 3 | ≤-20 |
| 4 | ≤+3 |
| 5 | ≤+7 |
| 6 | ≤+10 |

注　空气中水蒸气含量用压力露点表示。

表 5-3　　压缩空气最大含油量

| 含油量等级 | 最大含油量（$mg/m^3$） |
|---|---|
| 1 | ≤0.01 |
| 2 | ≤0.1 |
| 3 | ≤1.0 |
| 4 | ≤5 |
| 5 | ≤25 |

注　含油量指绝对压力为 0.1MPa、温度为 20℃、相对湿度为 0 条件下的含油量。

压缩空气品质等级用三个阿拉伯数字表示。例如，对某一污染物等级没要求，则用“—”代替。表示为：

固体粒子尺寸和浓度等级←□, □, □→油含量等级
↓水蒸气含量等级

## 二、真空系统

（1）相对真空度。指当绝对压力低于大气压时，其低于大气压力的部分，即

相对真空度＝绝对压力（绝对真空度）－测量地点的大气压

（2）极限真空度。指抽真空设备抽气时能达到的稳定最低绝对压力值。

# 第二节　空气压缩机和后处理系统

空气压缩机和后处理系统是指提供电厂所需的仪用、厂用、除灰输送用、布袋除尘器吹扫用、脱硫系统用、煤泥喷枪用等压缩空气的气源系统。该系统由空气压缩机、后处理设备、储气罐、管道和阀门等组成。

## 一、用气要求及特点

1. 设计范围和系统功能

（1）仪用压缩空气系统。火力发电厂仪用压缩空气系统设计范围是从空气压缩机吸气口到仪用用气点区域母管，系统功能是提供符合仪用用气压力、流量和品质要求的压缩空气，同时在全厂失电等故障时能满足安全停机时的用气要求。

（2）除灰输送用压缩空气系统。火力发电厂除灰输送用压缩空气系统设计范围是从空气压缩机吸气口到除灰输送用气点区域母管，系统功能是提供满足正压气力输送系统用气压力、流量和品质要求的压缩空气，通常包括飞灰、石灰石粉、渣等物料的气力输送用气。

（3）厂用压缩空气系统。火力发电厂厂用压缩空气系统设计范围是从空气压缩机吸气口到厂用用气点区域母管，系统功能是提供符合厂用用气压力、流量和品质要求的压缩空气。

厂用压缩空气系统通常在机组停炉时作为吹扫、检修用，一般不单独考虑厂用气量。

（4）其他用气系统。火力发电厂其他用气系统设计范围是从空气压缩机吸气口到其他用气点区域母管，系统功能是提供满足其他各用气压力、流量和品质要求的压缩空气。

2. 气源品质要求

（1）仪用压缩空气气源品质要求：

1）压力：0.6～0.75MPa。

2）温度：不大于 45℃。

3）压力露点：比工作环境最低温度低 10℃。

4）含尘粒径：小于 3μm。

5）含尘量：小于 $1mg/m^3$。

6）油分含量：小于 $10mg/m^3$，25℃，一个大气压状态下。

（2）厂用压缩空气气源品质要求：

1）压力：大于 0.6MPa。

2）压力露点：宜与输送用气要求相同。

3）含尘量：小于 $1mg/m^3$。

4）油分含量：小于 $12mg/m^3$，25℃，一个大气压状态下。

（3）除灰输送用压缩空气气源品质要求：

1）压力：大于 0.45MPa。

2）压力露点：最低环境温度。

3）含尘粒径：

含尘粒径（颗粒产品输送）：小于 5μm；

含尘量（颗粒产品输送）：小于 $5mg/m^3$；

含尘粒径（粉状产品输送）：小于1μm；

含尘量（粉状产品输送）：小于1mg/m³。

4）油分含量：

油分含量（颗粒产品输送）：≤1.0mg/m³，25℃，一个大气压状态下；

油分含量（粉状产品输送）：≤0.1mg/m³，25℃，一个大气压状态下。

注：含尘粒径、含尘量与含油量等级标准，参考GB/T 13277—1991《一般用压缩空气质量等级》。

3. 用气特点

（1）仪用空气参数应根据机组容量确定，通常由热控专业提出，其耗气量和压力相对稳定，属于稳定气源。无资料时，仪用空气压缩机配置方案可参考表5-4。

**表5-4　常见仪用空气压缩机配置方案**

| 机组容量 | 200MW或125MW等级机组 | 125MW等级CFB机组 | 300MW等级（含CFB等级机组） | 600MW等级（含CFB等级机组） | 1000MW等级机组 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 空气压缩机容量（m³/min） | 10 | 15～18 | 20 | 40 | 60 | 40 |
| 空气压缩机形式 | 喷油螺杆式 | 喷油螺杆式 | 喷油螺杆式 | 喷油螺杆式 | 喷油螺杆式 | 喷油螺杆式 |
| 空气压缩机台数 | 4 | | | | | 5 |
| 空气压缩机配置方案说明 | 2台运行，1台运行备用，1台检修备用与厂用公用 | | | | | 3台运行，1台运行备用，1台检修备用与厂用公用 |

注 1. 本表以2台机组为一个供气单元考虑。
2. 本表空气压缩机系统是按分散设计方式设计，分散设计见后说明。

（2）除灰输送用压缩空气耗气量与电厂物料输送量、物料的特性、输送距离等因素有关，根据气力输灰形式的特点，一般输灰等定期输送系统，其耗气量和压力会呈现出周期性波动，属波动气源；输石灰石粉等连续输送系统，其耗气量和压力相对稳定，属稳定气源。

## 二、设计要求

压缩空气系统的设计，应满足GB 50029—2014《压缩空气站设计规范》的规定。

1. 主要原则

（1）压缩空气的系统设计，在满足系统功能要求的前提下，还应满足安全、可靠、技术先进和节能环保的要求。

（2）当全厂压缩空气系统合并设计时，要遵循仪用气优先的原则。

（3）当气源为统一压力气源时，压缩空气系统应按总系统最高压力要求设计；当系统采用高、低压系统分开设计时，压缩空气系统应按各分系统的最高压力要求设计。

注：高、低压系统说明见后。

（4）相关强制性标准的规定如下：

1）除用户对压缩空气温度有特殊要求外，离心空气压缩机排气口应设置后冷却器。

2）离心空气压缩机的排气管上应装设止回阀和切断阀，空气压缩机与止回阀之间，必须设置放空管，放空管上应装设防喘振调节阀和消音器。

3）空气压缩机组的联轴器和皮带传动部分必须装设安全防护设施。

4）离心空气压缩机应设置高位油箱或者其他能够保证机器惰转时供油的设施。

5）储气罐上必须装设安全阀。储气罐与供气总管之间，应装设切换阀。

6）压缩空气站机器间通向室外的门应保证安全疏散、便于设备的出入和操作管理。离心压缩空气站的安全出口不应少于2个，且必须有1个直通室外；当双层布置时，运行层应有通往室外的安全梯。

7）压缩空气站的仪表与控制报警信号和自动保护控制装置应按附录H、附录I、附录J、附录K、附录L、附录M的规定装设。设有控制室时，附录中"应装"的仪表与控制报警信号应接入计算机控制系统。

8）离心空气压缩机应设以下控制：

a. 进气调节控制。

b. 机组防喘振控制系统。

c. 排气稳压控制系统或稳流控制系统。

2. 系统设计要求

（1）空气压缩机的型号、台数和不同空气品质、压力的供气系统，应根据供气系统的气量、压力、气源品质要求，以及投资、能耗、建设用地等管理要求，经技术经济比较后确定，并应符合下列要求：

1）螺杆空气压缩机的台数宜为3～6台（套）；当单机额定功率大于300kW时，不宜选用单级喷油螺杆

压缩机；工作压力小于或等于1.6MPa的空气压缩机组，在正常负荷下供气压力波动幅度不宜超过0.05MPa；当负荷变化较频繁时，宜选用1～2台具有变容或变频等节能型气量调节功能的压缩机；对同一品质、压力的供气系统，空气压缩机的型号不宜超过三种。

2）离心空气压缩机台数宜为2～5台，并宜采用同一型号；各单机运行时的容积流量不宜低于额定容积流量的70%。

（2）压缩空气站备用容量的确定，应符合下列要求：

1）当最大机组检修时，除通过调配措施可允许减少供气外，其余机组应保证生产的需气量。

2）当经调配仍不能保证生产所需气量时，可增设备用机组。

3）具有联通管网的分散压缩空气站，其备用容量，应统一设置。

（3）储气罐宜布置在空气压缩机与干燥净化装置之间，当负荷要求储气罐瞬间释放超过干燥净化装置处理量的压缩空气时，应在干燥净化装置后另行设置储气罐。

（4）仪用和除灰输送用压缩空气系统宜分设后处理系统，其他用气系统需根据具体工程要求确定是否设置后处理系统，后处理设备的选型、类型、台数应根据系统设计规定要求，结合具体工程条件，如气源流量、排气压力、气源品质、空气压缩机配置，以及投资、能耗、建设用地等管理要求，经技术经济比较后确定，并应符合下列要求：

1）应满足用户对空气干燥度及空气处理量和压力的要求。

2）当用户要求干燥压缩空气不能中断时，应设置备用压缩空气干燥装置。

3）压缩空气干燥装置的总处理容量，应能根据站房实际运行负荷进行调节。

4）工作压力小于10MPa、单台处理气量大于20 $m^3$/min时宜采用加热再生吸附式干燥装置或压缩热再生吸附式干燥装置。

5）当压缩空气湿度等级要求不高于5级时，应选用冷冻式干燥装置或压缩热再生吸附式干燥装置。

（5）压缩空气过滤器的设置应满足工艺对压缩空气质量等级的要求，并应符合下列要求：

1）应在空气干燥装置前、后和洁净气用气设备处设置空气过滤器。

2）应在湿度等级高于或等于2级，或固体颗粒等级高于或等于2级的干燥和净化压缩空气系统的配气台前、后处设置空气过滤器。

3）要求不能中断供气的用户，应设置备用压缩空气过滤器。

（6）压缩空气站应设置废油收集装置。

3. 管道设计要求

（1）压缩空气管道、管道附件的选用，应根据使用压力、温度、品质要求等因素，经技术经济比较后确定，且应符合下列规定：

1）无干燥净化要求的压缩空气或压缩空气湿度等级不高于4级且固体颗粒等级不高于3级的管道，如除灰输送用、常用等可采用碳钢管。

2）压缩空气湿度等级高于4级、不高于3级或固体颗粒等级高于3级、不高于2级的干燥和净化压缩空气管道，宜采用不锈钢管或铜管。

3）压缩空气湿度等级高于3级或固体颗粒等级高于2级的干燥和净化压缩空气管道，如仪用气应采用不锈钢管或铜管。

4）当压缩空气最高工作压力不大于0.8MPa、工作温度在–20～40℃之间，埋地敷设的压缩空气管道可采用SDR11 PE100系列聚乙烯管道。

5）管道附件的强度、密封、耐磨、抗腐蚀性能应与管材相匹配。

（2）压缩空气站中的压缩空气流速应不大于5m/s，压缩空气站后的主分配管路中压缩空气流速应不大于10m/s，主分配管路到使用点的压缩空气流速应不大于15m/s。从机组出口到主分配管路最远点的压降应不大于机组排气压力的10%。

4. 阀门设计要求

（1）阀门的参数选取应不低于管道的设计参数，阀门材质选择应与连接管道材质相匹配。

（2）压缩空气管道上的隔离阀宜为全通径式，其形式可根据通径的大小选择闸阀、截止阀或球阀。当通径小于或等于DN150时，宜选择截止阀；当通径大约为DN150时，宜选择闸阀；当要求迅速开启或关闭时，可选用球阀。

（3）压缩空气管道上的止回阀形式应根据布置位置，选择升降式或旋启式。

（4）压缩空气管道、储气罐上的疏水阀形式宜选用适用于空气介质的自动疏水阀。

## 三、典型系统设计

1. 系统流程

（1）仪用、厂用压缩空气系统由空气压缩机、后处理设备、储气罐、输送管道等组成。基本流程宜参照图5-1设计。

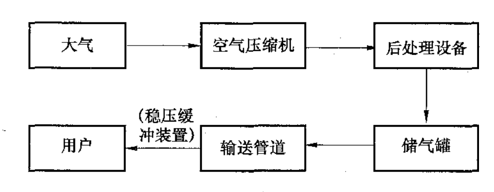



图5-1　仪用、厂用压缩空气系统设计流程图

（2）除灰输送用压缩空气系统由空气压缩机、储气罐、后处理设备、输送管道等组成。基本流程宜参照图 5-2 设计。

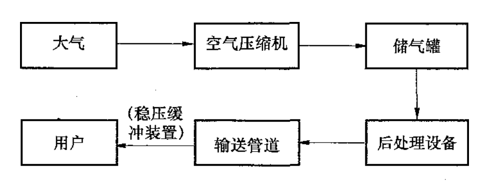



图 5-2 除灰输送用压缩空气系统设计流程图

2. 系统设计方式

（1）分散设计，分散布置。

1）该设计方式是过去较普遍采用的方式，仪用、厂用气源系统与除灰输送用、其他用气源系统分开设计，设备分别布置于不同建筑内。仪用、厂用气源设备通常布置在汽机房内或两台炉除尘器之间的电控楼内；除灰输送用空气压缩机房通常单独布置，如布置在输煤栈桥下。仪用、厂用气源系统采用 DCS 系统控制，除灰输送用、其他用气源系统采用除灰程控系统控制。

2）仪用气源系统与除灰输送用气源系统各自设备用。

（2）分散设计，集中布置。

1）该设计方式是仪用、厂用气源系统与除灰输送用、其他用气源系统两者分开设计，但设备集中布置于同一建筑内，集中管理。

2）仪用气源系统与除灰输送用气源系统各自设备用。

（3）联合设计，集中布置。

1）该设计方式是仪用、厂用与除灰输送用等压缩空气系统联合设计、后处理系统分开设计，设备集中布置。

2）压缩空气系统采用同型号规格的空气压缩机，所有空气压缩机出口用母管连通，通过设置隔离阀实现后处理系统分开设计，仪用、除灰输送用气源系统分别从隔离的母管接出，进入各自独立的后处理系统，公用备用空气压缩机。

3）系统通常由机组 DCS 系统控制。

（4）集中设计，集中布置。

1）该设计方式是仪用、厂用气源系统与除灰输送用等系统集中设计、后处理系统分开设计，设备集中布置。

2）压缩空气系统采用同型号规格的空气压缩机，所有空气压缩机出口用母管连通，仪用、除灰输送用气源等后处理系统直接从母管接出（母管上可不设置隔离阀，或设置常开隔离阀），进入各自独立的后处理系统，公用备用空气压缩机。

3）系统通常由机组 DCS 系统控制。

4）仪用气支管上宜设置止回阀，在各分系统支管上宜设置压力/流量监测装置或仪表。

（5）高低压系统分开设计，可集中布置，也可分散布置。该设计方式是当气源用户各压缩空气系统耗气量较大、压力差较大时，系统可采用高压和低压系统分开设计，各分系统设备可集中布置于同一建筑内，也可分散布置于不同建筑内。

气源系统设计方式的确定应结合具体工程，经过技术经济比较后确定，由于目前电力行业采用（3）、（4）两种设计方式最多，因此，下面常用系统配置方案按（3）、（4）方式说明。

3. 常用系统配置方案

（1）全螺杆空气压缩机的配置方案。系统的供气设备全部采用同型号规格的螺杆空气压缩机。多台空气压缩机的总排气量不宜小于压缩空气系统运行最大耗气量，其中备用空气压缩机台数设置如下：

1）当仪用空气压缩机运行台数为 1～3 台时，应设置 1 台仪用专用运行备用，1 台检修备用；当仪用空气压缩机运行台数为 4 台及以上时，应设置 2 台仪用专用运行备用，1 台检修备用；当仪用压缩空气系统与除灰输送、其他压缩空气系统合并设计时，检修备用空气压缩机可作为公共备用。

2）当除灰输送系统运行空气压缩机为 1～3 台时，设 1 台备用；当除灰输送系统运行的空气压缩机为 4 台及以上时，设 2 台备用；当除灰输送系统用空气系统与仪用压缩空气系统及其他压缩空气系统合并设计时，其中 1 台备用空气压缩机可与仪用检修备用空气压缩机合并。

（2）螺杆空气压缩机与离心空气压缩机组合的配置方案。系统的供气设备采用螺杆空气压缩机与离心空气压缩机。系统设计按离心空气压缩机提供满负荷的稳定气源，螺杆空气压缩机则提供波动气源组合方式设计。单台离心空气压缩机流量宜大于 100m$^3$/min，多台运行离心空气压缩机的总排气量宜等于系统稳定气源总气量；单台螺杆空气压缩机流量宜不大于 80m$^3$/min，且宜与仪用空气压缩机排气量相等，多台运行螺杆空气压缩机的总排气量宜按略大于系统波动气源总气量。备用空气压缩机台数设置如下：

1）当 1 台离心空气压缩机检修时，如备用螺杆空气压缩机总容量大于或等于离心空气压缩机容量（不包括仪用运行备用），可不设离心空气压缩机备用。

2）当 1 台离心空气压缩机检修时，如备用螺杆空气压缩机总容量小于离心空气压缩机容量（不包括仪用运行备用），应设 1 台备用。

3）当运行的螺杆空气压缩机为 3 台及以下时，

宜设2台备用，1台仪用运行备用，1台公共备用；运行的螺杆空气压缩机为4台及以上时，设3台备用，1台仪用运行备用，1台公共备用，1台输送备用。

（3）后处理设备配置方案。原则上后处理装置数量设置与空气压缩机一致，当布置条件受限时，也可2台甚至多台空气压缩机对应1台后处理装置；后处理装置的容量设计应适当略大于空气压缩机排气量。

## 四、设计计算

1. FAD流量与标准状态流量的计算

（1）当已知用气点压缩空气工作压力和体积流量，空气压缩机的FAD流量计算式为

$$q_f=(p_w/p)[(273+t)/(273+t_0)]q_e \tag{5-1}$$

式中 $q_f$——空气压缩机FAD体积流量，$m^3/min$；

$q_e$——用气点压缩空气体积流量，$m^3/min$；

$p_w$——用气点压缩空气工作压力，绝对压力，MPa；

$p$——空气压缩机工作环境压力，绝对压力，MPa；

$t_0$——空气压缩机出口空气温度，℃；

$t$——空气压缩机工作环境温度，℃。

（2）当已知空气压缩机的FAD流量，标准状态体积流量的计算式为

$$q_N=(p/p_0)[(273+20)/(273+t)]q_f \tag{5-2}$$

式中 $q_N$——空气压缩机标准体积流量，$m^3/min$；

$p_0$——标准大气压，MPa。

2. 系统出力计算

（1）系统用气总量按式（5-3）计算

$$q_z=q_y+q_s+q_t \tag{5-3}$$

式中 $q_z$——系统计算总气量，$m^3/min$；

$q_y$——机组仪用压缩空气总量，$m^3/min$，按机组最大连续用气量乘以富裕系数计算。由热控专业提出，无资料时可参考表5-4；

$q_s$——除灰输送用压缩空气总量，$m^3/min$，不宜小于气力除灰系统设计出力时计算输送空气量的110%（工程前期设计过程中，除灰输送用气气量的估算参见本书第二章）；

$q_t$——其他压缩空气用户所需气量，$m^3/min$。

注：由于仪用检修备用空气压缩机或公共备用空气压缩机可作为厂用空气压缩机，除工程特殊要求外，厂用用气不计入总耗气量。

（2）系统气量分析

$$q_z=q_d+q_b \tag{5-4}$$

式中 $q_d$——稳定气量，$m^3/min$，系统运行时，耗气量稳定极少波动的部分；

$q_b$——波动气量，$m^3/min$，系统运行时，耗气量出现周期性波动的部分。

系统气量$q_z$的组成部分里，$q_y$为稳定气源，$q_b$为周期波动气源。

注：1. 仪用用气、布袋除尘器用气、连续气力输送用气（如一级气力输送石灰石粉）、煤泥喷吹用气等按稳定气源用户考虑。

2. 气力输灰系统用气，其他非连续输送用气等按波动气源用户考虑，其中气力输灰系统用气可按设计出力耗气量的50%～55%作为平均气量即稳定气源，45%～50%为波动气量考虑。

3. 根据工程实际经验，$q_z$低于300$m^3/min$时，宜采用全螺杆方案；$q_z$大于400$m^3/min$时，宜采用离心空气压缩机与螺杆空气压缩机组合的方案。

3. 系统管道管径计算

（1）压缩空气供气管道管径按式（5-5）计算

$$d_i=18.81\sqrt{\frac{q_w}{v}} \tag{5-5}$$

式中 $d_i$——管子内径，mm；

$v$——压缩空气在工作状态下的流速，m/s；

$q_w$——压缩空气在工作状态下的体积流量，$m^3/h$。

压缩空气在工作状态下的体积流量可按式（5-6）计算

$$q_w=\frac{q_s(273+t)\times 0.1013}{p\times(273+20)} \tag{5-6}$$

式中 $q_s$——压缩空气基准体积流量（在绝对压力为101.3kPa，温度为20℃状态下），$m^3/h$；

$p$——压缩空气的工作压力，绝对压力，MPa；

$t$——压缩空气的工作环境温度，℃。

（2）压缩空气系统的介质流速应根据工作压力、管道允许压力降和工作场所选择。压缩空气管道介质流速可按表5-5取值。

**表5-5 推荐的压缩空气管道介质流速**

<table>
<tr><th rowspan="2">工作场所</th><th colspan="3">介质流速（m/s）</th></tr>
<tr><th>仪用压缩空气</th><th>除灰输送用压缩空气</th><th>厂用压缩空气</th></tr>
<tr><td>压缩空气站内</td><td colspan="3">≤5</td></tr>
<tr><td>主分配管</td><td colspan="3">≤10</td></tr>
<tr><td>主厂房、车间</td><td>10～15</td><td rowspan="2">8～15</td><td>8～15</td></tr>
<tr><td>厂区</td><td>10～12</td><td>8～10</td></tr>
</table>

（3）管道压力损失计算。气体在管内流动时，在直线管段产生摩擦阻力；在阀门、三通、弯头、变径管等处产生局部阻力，这两种阻力导致气体压力损耗。因此，管道的压力损失为管道的直线管道摩擦阻力和局部阻力之和，即

$$\Delta p=\Delta p_1+\Delta p_2 \quad (5\text{-}7)$$

式中　$\Delta p$——管道压力损失，Pa；

$\Delta p_1$——直线管段摩擦阻力，Pa；

$\Delta p_2$——管道局部阻力，Pa。

1）直线管道压力损失计算

$$\Delta p_1=\lambda\frac{L}{d}\times\frac{v^2\rho}{2g}\times 10 \quad (5\text{-}8)$$

$$\rho=\rho_0\times[273/(273+t)]\times(p/0.1013) \quad (5\text{-}9)$$

$$\lambda=\frac{1}{\left(1.14+2\lg\frac{d}{\varepsilon}\right)^2} \quad (5\text{-}10)$$

式中　$L$——直线管段长度，m；

$d$——管道内径，m；

$\rho$——工作状态下压缩空气密度，kg/m³；

$v$——工作状态下压缩空气流速，m/s；

$g$——重力加速度，m/s²；

$\lambda$——管道摩擦阻力系数，见表 5-6；

$\rho_0$——温度为 273K（0℃），压力为 0.1013MPa 状态下的干空气密度，取 1.293kg/m³；

$273+t$——计算点的环境空气温度，热力学温度，K；

$p$——计算点的环境大气压力，绝对压力，MPa；

$\varepsilon$——管道内壁绝对粗糙度，mm；

$d$——管道内径，mm。

表 5-6　　管道摩擦阻力系数 $\lambda$ 值

| 公称直径 DN（mm） | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\varepsilon=0.1$mm | 0.0298 | 0.0278 | 0.0256 | 0.0427 | 0.0234 | 0.0218 | 0.0207 | 0.0196 | 0.0186 | 0.0178 | 0.0166 | 0.0158 | 0.0152 |
| $\varepsilon=0.2$mm | 0.0371 | 0.0343 | 0.0314 | 0.0301 | 0.0284 | 0.0263 | 0.0248 | 0.0234 | 0.0221 | 0.0211 | 0.0195 | 0.0185 | 0.0177 |
| $\varepsilon=0.5$mm | 0.0517 | 0.0472 | 0.0425 | 0.0405 | 0.0379 | 0.0347 | 0.0324 | 0.0303 | 0.0284 | 0.0269 | 0.0240 | 0.0232 | 0.0221 |

2）管道局部阻力计算

$$\Delta p_2=\zeta\frac{v^2\rho}{2g}\times 10 \quad (5\text{-}11)$$

式中　$\zeta$——局部阻力系数。

当量长度与局部阻力的换算

$$L_d=\zeta\frac{d}{\lambda} \quad (5\text{-}12)$$

$$\Delta p=\lambda\frac{L+L_d}{d}\times\frac{v^2\rho}{2g}\times 10 \quad (5\text{-}13)$$

当$\varepsilon=0.2$mm 时的局部阻力系数及当量长度见附录 E。

4. 储气罐容积计算

（1）压缩空气系统储气罐的容量，可按式（5-14）计算

$$V=\tau q_i(273+t)p/[(273+t_1)(p_1-p_2)] \quad (5\text{-}14)$$

式中　$V$——储气罐总容积，m³；

$\tau$——维持运行耗气量的时间，min；

$q_i$——各用气设备、用气点单位时间内的最大耗气量总量，m³/min；

$p$——计算点的环境压力，MPa；

$p_1$——压缩空气的正常工作压力，MPa；

$p_2$——压缩空气的最小工作压力，MPa；

$t$——环境最高温度，℃；

$t_1$——环境平均温度，℃。

（2）储气罐设置应符合下列要求：

1）仪用储气罐数量宜不少于 2 个，储气罐的总容量应能维持在全厂失电时不小于 5min 机组最大连续用气量；压缩空气的正常工作压力可取 0.7～0.75MPa，最小工作压力可选 0.6MPa。

2）除灰输送用储气罐的容量和数量应根据具体工程除灰系统的运行方式和耗气要求等确定。

## 五、空气压缩机选型

目前电厂气源系统采用的空气压缩机类型通常为螺杆空气压缩机及离心空气压缩机。

（一）螺杆空气压缩机

1. 结构形式

（1）基本结构。螺杆空气压缩机是一种容积式压缩机，通常所称的螺杆压缩机是指双螺杆压缩机（单螺杆压缩机在电力行业应用极少），其通过两个带有螺旋形齿轮的转子相互啮合，将气体压缩并排出。

喷油润滑螺杆空气压缩机的基本结构如图 5-3 所示。

（2）常规用调节方式。螺杆式空气压缩机常见的气量调节方式有加卸载调节、进气节流调节、变转速调节、变容调节、进气节流/放空调节。

1）加卸载调节，又称停止吸入调节，通过设置空气压缩机排气压力的加载下限和卸载上限，自动检测

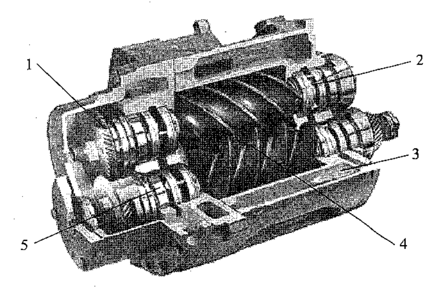



图 5-3 喷油润滑螺杆空气压缩机的基本结构

1—同步齿轮；2—轴密封；3—冷却套；
4—不对称转子；5—抗摩擦滚珠和滚柱轴承

实际的排气压力控制空气压缩机加载/卸载，从而改变供气量与耗气量匹配。采用这种方法调节时，空气压缩机停止吸入，处于空转状态，因而只能进行间断调节。而且空转造成了一定的真空度，在含有腐蚀性和爆炸性危险气体的场合，不可使用。

2）进气节流调节，是通过在螺杆压缩机进气管上加装节流阀，使吸入气体节流后降低压力和密度，从而达到调节排气量的目的。这种调节方法一般仅用于小型空气压缩机及工况基本稳定的机组。

3）变容调节，又称滑阀调节，是利用一个能在气缸轴线方向平行来回移动的滑动调节阀使齿间容积在接触线从吸入端向排出端移动的前一段时间内仍与吸入口相通，并使这部分气体回流至吸入口，实际上，就是减少螺杆的有效轴向长度达到调节排气量的目的。滑阀调节的调节范围广，可在100%～10%的排气量范围内进行无级自动调节；100%～50%的排气量范围内，调节的经济性好；在排气量低于50%以下时，原动机功率的降低不显著。

4）变转速调节，是改变转子转速的调节方式，由于压缩机的容积流量与转速成正比，因此改变压缩机的转速就可以达到调节流量的目的。这种调节下，如果不考虑相对泄漏量的变化，压缩机的功率下降是与排气量的减少成正比的，因此这种调节方法经济性好。但随着转速的降低其气体泄漏量增加，效率降低，所以通常的调节范围是额定转速的60%～100%。特别是在高压比下，调节范围会更加狭窄。

5）进气节流/放空调节，实际上是进、排气管道自由连通和进气节流调节联合使用的一种综合调节方法。

几种调节方式功耗和流量的相对关系见图5-4。

由图5-4可知，变容调节和变转速调节是相对比较节能的调节方式，而在60%～100%的容量范围内，变容调节是最节能的方式。

2. 分类及特点

（1）螺杆空气压缩机的分类及特点见表5-7。

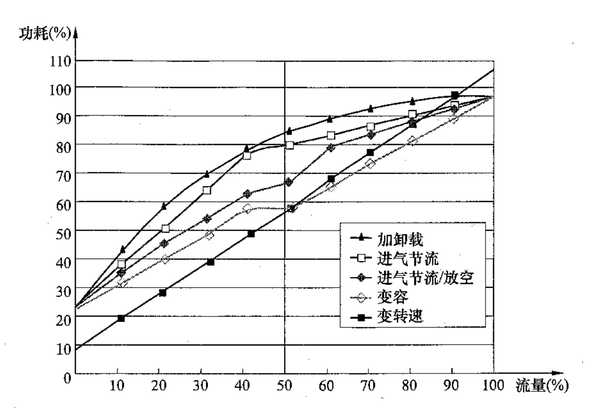



图 5-4 几种调节方式的功耗与流量的相对关系图

**表 5-7 螺杆空气压缩机的分类及特点**

| 分类方式 | 分类 | 主要特点 |
|---|---|---|
| 按转子间密封情况分 | 喷油螺杆空气压缩机 | 将润滑油喷至压缩腔，通常也喷到压缩机的轴承。喷油的作用是冷却、润滑、密封和降噪 |
| | 无油螺杆空气压缩机 | 主机无需喷油就可进行压缩，产生无油压缩空气。压缩比受到近期与排气之间温差的限制，通常设计为多级，级间设有冷却器 |
| 按冷却方式分 | 水冷式螺杆空气压缩机 | 设置水冷却器 |
| | 风冷式螺杆空气压缩机 | 设置冷却风扇 |
| 按压缩级数分（两者的功率比较见图5-5） | 单级螺杆空气压缩机 | 主机内的一对转子以高压缩比进行一级压缩获得压缩空气 |
| | 双级螺杆空气压缩机 | 主机部件里带有两对转子，压缩过程由第一级和第二级串接压缩完成。其主机以较低压缩比进行两级压缩，每一级后，气体先经冷却，再进一步压缩，从而降低了第一级的压缩比，提高效率 |
| 按排气压力① | 低压空气压缩机 | 排气压力≤0.5MPa |
| | 高压空气压缩机 | 排气压力为0.7～0.85MPa |

① 此高、低压系统分类是按电厂用螺杆空气压缩机惯例进行分类（非压缩机行业分类）。

（2）一级压缩与二级压缩的节能性说明。一级压缩与二级压缩的节能性在较大容量螺杆压缩机上较为明显，其节能原理见图5-5。

由图5-5可知，等温压缩最省功，但在实际压缩过程中无法做到等温压缩。两级压缩比一级压缩节省了22′33″面积的功率（阴影部分）。

目前，多家公司推出了90～350kW的二级压缩螺杆空气压缩机，排气量范围为18～70m³/min。

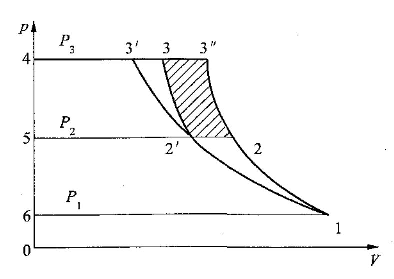



图 5-5 一级压缩与二级压缩的功率图

p—压缩空气压力；V—压缩空气体积；12′3′—等温压缩过程，与纵坐标形成的面积；613′4—等温压缩的指示功；123″—一级压缩过程，与纵坐标形成的面积；613″4—一级压缩的指示功；12、22′、2′3—两级实际压缩过程，与纵坐标形成的面积；6125 和 52′34 之和（6122′34）—两级压缩的指示功

3. 适用范围

适用于电厂压缩空气系统连续或定期运行，具有运行可靠、气量调节方便的特点，尤其适用波动气源的要求，其中喷油螺杆空气压缩机应用最多，一般高压喷油螺杆空气压缩机的排气流量≤70m³/min；低压喷油螺杆空气压缩机的排气流量一般≤55m³/min。

4. 主要技术参数及规格

（1）常用单级压缩喷油螺杆空气压缩机主要技术参数可参考表 5-8。设计时应根据实际工程进行校核验算。

（2）常用双级压缩喷油螺杆空气压缩机主要技术参数可参考表 5-9。设计时应根据实际工程进行校核验算。

（3）常用低压喷油螺杆空气压缩机主要技术参数可参考表 5-10。设计时应根据实际工程进行校核验算。

表 5-8 **M 系列单级压缩喷油螺杆空气压缩机主要技术参数**

| 型号 | | | | M45 | M55 | M75 | M90 | M110 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 排气压力（MPa） | 0.75 | 容积流量（m³/min） | | 7.4 | 10.1 | 13 | 17.1 | 20.5 |
| | 0.85 | | | 7.1 | 9.1 | 12.1 | 15.6 | 19.6 |
| 冷却方式 | 风冷 | 冷却风扇电动机功率（kW） | | 4 | | | 9 | |
| | | 冷却风量（m³/min） | | 207 | | | 425 | |
| | 水冷 | 冷却水量 | 32℃ | 2.3 | | — | — | — |
| | | | 46℃ | 2.73 | | 4.5 | 8.4 | 10.5 |
| | | 冷却水压（MPa） | | 0.25～0.45 | | | 0.3～0.45 | |
| 主驱动电动机 | | 电动机功率（kW） | | 45 | 55 | 75 | 90 | 110 |
| | | 电动机转速（r/min） | | 2960 | | 1480 | 1485 | |
| 机组 | | 出口气体含油量（mg/m³） | | <3 | | | — | |
| | | 传动方式 | | 齿轮直连 | | | 齿轮直连 | |
| | | 最大件质量（kg） | | 350 | 443 | 550 | 841 | |
| | | 机组质量（kg） | | 953 | 1270 | 1315 | 2617 | 2640 |
| | | 外形尺寸（长×宽×高，mm） | | 1605×1689×1696 | | | 3124×1587×1905 | |
| 型号 | | | | M132 | M160 | M185 | M250 | M350 |
| 排气压力（MPa） | 0.75 | 容积流量（m³/min） | | 24.1 | 29.2 | 32 | 43.9 | 60.7 |
| | 0.85 | | | 22.8 | 26.6 | 30 | 42.5 | 56.9 |
| 冷却方式 | 风冷 | 冷却风扇电动机功率（kW） | | 9 | | | 15 | |
| | | 冷却风量（m³/min） | | 425 | | | 585 | 768 |
| | 水冷 | 冷却水量 | 32℃ | 2.3 | — | | 15 | 18.9 |
| | | | 46℃ | 14 | 14 | | 18 | 21.6 |
| | | 冷却水压（MPa） | | 0.25～0.45 | | | | |
| 主驱动电动机 | | 电动机功率（kW） | | 132 | 160 | 185 | 250 | 350 |
| | | 电动机转速（r/min） | | 1485 | | | 1482 | 1488 |
| 机组 | | 出口气体含油量（mg/m³） | | <3 | | | — | |
| | | 传动方式 | | 齿轮直连 | | | 齿轮直连 | |
| | | 最大件质量（kg） | | 943 | 1055 | 1230 | 1140/1860 | 1930 |
| | | 机组质量（kg） | | 2731 | | 3480 | 4934/5160 | 6187/7075 |
| | | 外形尺寸（长×宽×高，mm） | | 3124×1587×1905 | 4000×1930×2416 | | | |

表 5-9　　**M 系列双级压缩喷油螺杆空气压缩机主要技术参数**

| 型号 | | | M200 | M250 | M300 | M350 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 排气压力（MPa） | 0.75 | 容积流量（$m^3$/min） | 41.5 | 49.2 | 60.2 | 69.2 |
| | 0.85 | | 38.8 | 47.4 | 56.0 | 64.1 |
| 冷却方式 | 风冷 | 冷却风扇电动机功率（kW） | 15 | | | |
| | | 冷却风量（$m^3$/min） | 583 | | 768 | |
| | 水冷 | 冷却水量 30℃ | — | — | 16.4 | 18.8 |
| | | 冷却水量 46℃ | 14.2 | 17.7 | 18.2 | 21.6 |
| | | 冷却水压（MPa） | 0.25～0.45 | | | |
| 主驱动电动机（高压） | | 电动机功率（kW） | 200 | 250 | 300 | 350 |
| | | 电动机转速（r/min） | 1482 | | 1484 | |
| 机组 | | 出口气体含油量（mg/$m^3$） | — | | | |
| | | 传动方式 | 齿轮直连 | | | |
| | | 最大件质量（kg） | 970 | 1860 | 1960 | 2400 |
| | | 机组质量（kg）（风冷/水冷） | 6660/6520 | 6740/6600 | 7370/7470 | 8100/8200 |
| | | 外形尺寸（长×宽×高，mm） | 4650×1930×2146（高压电动机） | | | |

表 5-10　　**KHE 系列低压喷油螺杆空气压缩机主要技术参数**

| 型号 | KHE45-5 | KHE75-5 | KHE90-5 | KHE110-5 | KHE132-5 | KHE160-5 | KHE250-5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 排气压力（MPa） | 0.5 | | | | | | |
| 排气量（$m^3$/min） | 10.70 | 17.49 | 22.75 | 25.44 | 30.00 | 39.83 | 55.73 |
| 电动机功率（kW） | 45 | 75 | 90 | 110 | 132 | 160 | 250 |
| 质量（kg） | 2050 | 2500 | 3200 | 3250 | 3750 | 4000 | 6000 |
| 外形尺寸（长×宽×高，mm） | 2220×1410×1720 | 2560×1490×1820 | 3110×1690×2200 | 3110×1690×2200 | 3660×1760×2190 | 3660×1760×2190 | 4160×2160×2300 |

（二）离心空气压缩机

1. 结构形式

（1）基本结构。目前电厂采用的离心空气压缩机是一种多级齿轮增速式离心压缩机，主要由转子、定子和辅助设备等部件组成。转子包括叶轮和轴，定子的主体是机壳（气缸），定子上还安装有扩压器、弯道、回流器、进气管、排气管及部分轴封等。离心空气压缩机通常采用 2～3 级压缩。

典型的三级压缩离心空气压缩机结构如图 5-6 所示。

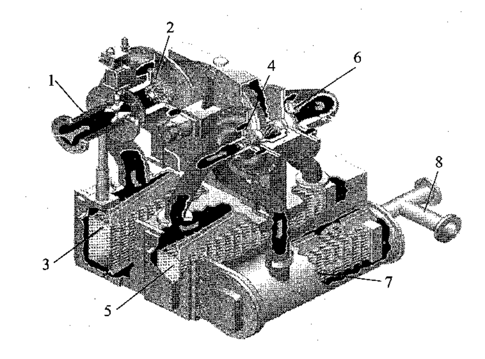


图 5-6　离心空气压缩机结构图

1—空气进气段；2—第一级压缩叶轮；3—第一级中间冷却器；4—第二级压缩叶轮；5—第二级中间冷却器；6—第三级压缩叶轮；7—后部冷却器；8—压缩空气排气段

（2）常用调节方式。目前离心空气压缩机主要采用进气导叶调节气量，也是一种进气节流调节方式。其流量可调范围为 75%～100%，如果用气量再减少，则需排气放空，否则就会出现“喘振”现象。

2. 分类及特点

（1）分类。

1）按轴的形式分为单轴多级式（1 根轴上串联几个叶轮）和双轴多级式（2 根轴上串多个叶轮）。

2）按气缸的形式分为水平剖分式和垂直剖分式。

3）按级间冷却形式分为机外冷却（每段压缩后气体输出机外进入冷却器）和机内冷却（冷却器和机壳铸为一体）。

（2）主要特点。

优点：

1）排气量大，排气均匀，气流无脉冲。

2）为无油空气压缩机，机内不需要润滑。

3）比功率小，能耗低。

缺点：

1）对气量变化适应性差。在机组开车、停车、运行中，负荷变化大。

2）调节范围窄，调节时不节能。

3. 适用范围

离心空气压缩机适用于电厂压缩空气系统中稳定用气量大、连续运行的工况。

4. 主要技术参数及规格

常用离心空气压缩机主要技术参数可参考表 5-11。设计时应根据实际工程进行校核验算。

**表 5-11　C 系列常用离心空气压缩机主要技术参数**

| 压力（MPa） | 流量（$m^3$/min） | 功率（kW） |
|---|---|---|
| 0.2 | 90～160 | 270～430 |
| | 100～140 | 200～350 |
| | 130～185 | 200～450 |
| | 255～450 | 600～1100 |
| 0.5～1.0 | 60～115 | 300～660 |
| | 120～170 | 350～1100 |
| | 170～255 | 750～1500 |
| | 270～450 | 1300～2600 |

## 六、后处理设备选型

空气压缩机排出的压缩空气里含有多种杂质：①水，包括水雾、水蒸气、凝结水；②油，包括油雾、油蒸汽；③各种固态物质，如锈泥、金属粉末、橡胶细末、焦油粒及滤材、密封材料的细末等。

气源系统的后处理设备是指按照物理、化学或生物学等原理，对压缩空气进行处理以去除其中污染物的各种设备，火力发电厂实现压缩空气净化措施的设备通常有干燥机、除尘或除油过滤器、气/液分离器等。

### （一）干燥机

压缩空气经后冷却器后仍有一定的水分，其含量取决于空气的温度、压力。工业上常用的气体干燥方法有吸收法、吸附法、冷冻法及压力除湿法。火力发电厂压缩空气干燥处理一般采用吸附法和冷冻法。

根据对压缩空气压力露点要求的不同，可以选用不同类型的干燥机。常用的压缩空气干燥机有冷冻式压缩空气干燥机、吸附式压缩空气干燥机和组合式压缩空气干燥机三种。

1. 冷冻式压缩空气干燥机

（1）结构形式。冷冻式压缩空气干燥机利用制冷装置使压缩空气冷却到一定的露点温度，析出空气中的饱和水，通过汽水分离器和疏水器将水排出，从而使压缩空气得到干燥，主要由热交换系统、制冷系统和电气控制系统三部分组成。

对冷冻式干燥机的大气露点一般要求为−25～−17℃，相当于 0.7MPa 下的 2～10℃。

冷冻式压缩空气干燥机的能耗比为 3%～5%。

（2）分类。按冷凝器的冷却方式分为风冷型、水冷型两种。

按进气温度可分为常温进气型（进气温度在 45℃以下）和高温进气型（进气温度在 45℃以上）。

（3）适用范围。在火力发电厂空气压缩机及后处理的压缩空气系统中，冷冻式压缩空气干燥机宜用于压缩空气湿度等级要求不高于 5 级的条件，环境温度不低于 7℃。

（4）主要技术参数及规格。

常用冷冻式压缩空气干燥机主要参数可参考表 5-12。设计时应根据实际工程进行校核验算。表 5-12 中流量参数基于进气压力为 0.7MPa，环境温度为 38℃。不同工况下的空气流量需将表 5-12 中名义流量与相应的修正系数相乘。

**表 5-12　SLAD 系列冷冻式干燥机主要技术参数**

| 类型 | 进气压力（MPa） | 压力露点（℃） | 压力损耗 | 空气处理量（$m^3$/min） | 冷却风扇功率（W） | 冷却风量/冷却水量（$m^3$/h） | 安装尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 常温风冷型冷冻式压缩空气干燥机 | 0.6～1.0 | 2～10 | ≤进气压力的 3% | 22 | 2×240 | 11160 | 1670×800×1663 |
| | | | | 26.8 | 2×240 | 11160 | 1820×800×1713 |
| | | | | 32 | 2×380 | 15240 | 1900×860×1875 |
| | | | | 43.5 | 3×240 | 16740 | 2200×930×1941 |

续表

| 类型 | 进气压力（MPa） | 压力露点（℃） | 压力损耗 | 空气处理量（$m^3/min$） | 冷却风扇功率（W） | 冷却风量/冷却水量（$m^3/h$） | 安装尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 常温风冷型冷冻式压缩空气干燥机 | 0.6～1.0 | 2～10 | ≤进气压力的3% | 53 | 3×380 | 22860 | 2450×900×2110 |
| | | | | 67 | 4×380 | 30480 | 2140×1450×1787 |
| | | | | 90 | 4×550 | 42400 | 2070×1600×2029 |
| 常温水冷型冷冻式压缩空气干燥机 | 0.6～1.0 | 2～10 | ≤进气压力的3% | 22 | — | 3.6 | 1400×700×1463 |
| | | | | 26.8 | — | 4.6 | 1570×800×1433 |
| | | | | 32 | — | 5.6 | 1500×860×1576 |
| | | | | 43.5 | — | 7.2 | 1900×880×1605 |
| | | | | 53 | — | 9.2 | 2230×900×1605 |
| | | | | 67 | — | 10.8 | 2140×1000×1787 |
| | | | | 90 | — | 12.4 | 2130×1200×2006 |

2. 吸附式压缩空气干燥机

吸附式压缩空气干燥机是利用吸附剂（活性氧化铝、硅胶、分子筛等）可吸附水分的特性来除去压缩空气中的饱和水，再利用干燥空气或加热后的环境气体或高温压缩空气对吸附剂进行再生。火力发电厂用吸附式压缩空气干燥机一般制成双筒形式，在程序控制器控制下，两筒交替工作，一筒吸收水分，另一筒解吸再生，两筒连续循环工作。经吸附干燥后，出口压缩空气的压力露点可达到–40℃，甚至更低。

（1）分类和特点，见表5-13。

**表5-13　吸附式压缩空气干燥机的分类及特点**

| 类型 | 特　点 | 再生耗气量 | 能耗比 | 应　用 |
|---|---|---|---|---|
| 无热再生吸附式干燥机 | 把干燥后的压缩空气分流出来一部分，降压至接近大气压（其中的水蒸气分压很低），在不加热的情况下再生已饱和吸附剂 | ≥15%～20% | 18% | 基本属淘汰产品，少量应用于小流量（≤20$m^3$）场合 |
| 微热再生吸附式干燥机 | 利用加热器对再生气进行加热的吸附干燥机。与无热再生干燥机相比，微热再生干燥机增加了再生气加热器 | 12%～16% | 18% | 现在基本属淘汰产品，少量应用于小流量（≤20$m^3$）场合 |
| 鼓风外加热吸附式干燥机 | 用鼓风机对再生空气进行加热的再生干燥机。其在加热再生阶段的再生空气取自环境空气，在冷吹阶段使用干燥后的压缩空气或环境空气 | 3%～6% | 8%～10% | 适用于要求再生耗气量小的场合 |
| 压缩热再生吸附式干燥机 | 利用离心空气压缩机的压缩热再生的吸附式压缩空气干燥机。空气压缩机排出的高温压缩空气具有高热量、高不饱和度这两个性质，压缩热再生吸附干燥机利用这种原始压缩空气对吸附剂进行加热再生 | 4%～8% | 1%～2% | 仅适用于配备无油机，通常用于大型离心空气压缩机 |

注　鼓风外加热再生吸附式干燥机和压缩热再生吸附式干燥机目前市场上已有零气耗型。其性能参数参见表5-15和表5-16。

（2）适用范围。吸附式压缩空气干燥机适用于对压力露点要求高的场合（如–2～–40℃，甚至更低）。

（3）主要技术参数及规格。常用设备参数可参考表5-14～表5-16。设计时应根据实际工程进行校核验算。

表5-14～表5-16中流量参数基于进气压力为0.7MPa，环境温度为38℃。不同工况下的空气流量需将表5-14～表5-16中名义流量与相应的修正系数相乘。

**表5-14　SLAD系列吸附式压缩空气干燥机参数**

| 类　型 | 进气温度（℃） | 再生耗气量（%） | 空气处理量（$m^3/min$） | 干燥剂质量（kg） | 加热器功率（kW） | 冷却水量（$m^3/h$） | 安装尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 无热再生吸附式干燥机 | 20～45 | ≤14% | 22 | 492 | — | — | 1933×679×2415 |
| | | | 26.8 | 578 | — | — | 1933×679×2738 |

续表

| 类　型 | 进气温度（℃） | 再生耗气量（%） | 空气处理量（$m^3$/min） | 干燥剂质量（kg） | 加热器功率（kW） | 冷却水量（$m^3$/h） | 安装尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 无热再生吸附式干燥机 | 20～45 | ≤14% | 32 | 705 | — | — | 2101×800×2762 |
| | | | 43.5 | 1002 | — | — | 2200×870×2876 |
| | | | 53 | 1171 | — | — | 2233×950×2934 |
| | | | 67 | 1334 | — | — | 2416×1060×2827 |
| | | | 90 | 1885 | — | — | 2716×1140×3164 |
| 微热再生吸附式干燥机 | 20～45 | ≤7% | 22 | 492 | 8 | — | 1933×736×2415 |
| | | | 26.8 | 578 | 10 | — | 1903×823×2738 |
| | | | 32 | 705 | 12 | — | 2101×913×2762 |
| | | | 43.5 | 1002 | 15 | — | 2200×1002×2876 |
| | | | 53 | 1171 | 18 | — | 2213×1002×2894 |
| | | | 67 | 1718 | 22 | — | 2616×1270×2857 |
| | | | 90 | 1932 | 27 | — | 2816×1453×2911 |
| 鼓风热再生吸附式干燥机 | 5～45 | ≤3% | 10～300 | — | — | — | — |
| 压缩热再生吸附式干燥机 | 110～150 | ≤1.5% | 40～400 | — | — | — | — |

**表 5-15**　　常用鼓风外加热零气耗干燥机技术参数

| 型号 | 处理气量（$m^3$/min） | 连接尺寸（mm） | 外形尺寸（长×宽×高，mm） | 质量（kg） | 总功率（kW） | 冷却水耗量（t/h） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| EHD15 | 15 | DN50 | 2800×1700×2800 | 4100 | 12 | — |
| EHD18 | 18 | DN65 | 2900×1800×2800 | 4500 | 12 | |
| EHD24 | 24 | DN65 | 3000×1900×2900 | 4800 | 21 | |
| EHD32 | 32 | DN80 | 3100×1900×2900 | 5000 | 24 | |
| EHD42 | 42 | DN80 | 3200×2000×3000 | 5500 | 30 | |
| EHD52 | 52 | DN100 | 3200×2000×3000 | 5800 | 36 | |
| EHD60 | 60 | DN100 | 3500×2000×3100 | 6200 | 42 | |
| EHD75 | 75 | DN125 | 3600×2500×3100 | 6500 | 42 | |
| EHD84 | 84 | DN125 | 3800×2500×3100 | 6800 | 54 | |
| EHD105 | 105 | DN125 | 4000×2600×3200 | 7000 | 67 | 2.18 |
| EHD120 | 120 | DN150 | 4100×2600×3200 | 7500 | 78 | 2.50 |
| EHD140 | 140 | DN150 | 4200×2700×3450 | 8500 | 90 | 2.90 |
| EHD160 | 160 | DN150 | 4350×2750×3450 | 9500 | 108 | 3.32 |
| EHD180 | 180 | DN150 | 4350×2750×3500 | 11000 | 126 | 3.74 |
| EHD200 | 200 | DN200 | 4400×2800×3600 | 13000 | 135 | 4.16 |
| EHD250 | 250 | DN200 | 4500×2800×4000 | 16000 | 160 | 5.20 |
| EHD300 | 300 | DN250 | 5200×2850×4200 | 21000 | 163 | 6.24 |
| EHD350 | 350 | DN250 | 5500×2850×4500 | 23000 | 192 | 7.28 |
| EHD400 | 400 | DN300 | 6400×2900×5300 | 26000 | 240 | 8.32 |

表 5-16　　CHD 系列压缩热零气耗干燥机技术参数

| 型号 | 处理气量（$m^3$/min） | 连接尺寸（mm） | 外形尺寸（长×宽×高，mm） | 质量（kg） | 总功率（kW） | 冷却水耗量（t/h） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CHD0420 | 42 | DN100 | 3730×2200×3100 | 6000 | 30 | 16.2 |
| CHD0600 | 60 | DN100 | 3820×2200×3380 | 6500 | 48 | 26 |
| CHD0800 | 80 | DN150 | 4280×2750×3500 | 9000 | 48 | 34 |
| CHD1000 | 100 | DN150 | 4300×2300×3790 | 9100 | 54 | 42 |
| CHD1200 | 120 | DN200 | 5000×2730×3590 | 11300 | 72 | 51 |
| CHD1600 | 160 | DN200 | 5800×3100×4000 | 14000 | 81 | 52 |
| CHD1800 | 180 | DN200 | 4980×2885×4455 | 19000 | 84 | 78.4 |
| CHD2000 | 200 | DN200 | 6000×3200×4400 | 21500 | 96 | 65 |
| CHD2500 | 250 | DN200 | 6400×3700×4380 | 24100 | 112 | 106 |
| CHD3000 | 300 | DN250 | 6600×2900×5180 | 25000 | 127 | 127 |
| CHD3200 | 320 | DN250 | 6600×3000×5259 | 26000 | 127 | 136 |
| CHD3700 | 370 | DN250 | 6700×3125×5350 | 34000 | 135 | 157 |
| CHD4000 | 400 | DN300 | 7200×3810×5620 | 40000 | 144 | 170 |

3. 冷冻吸附组合式干燥机

（1）结构形式。冷冻吸附组合式干燥机由冷冻式干燥机和吸附式干燥机通过管路连接而成。通常有冷冻式干燥机与无热再生吸附式干燥机组合、冷冻式干燥机与微热再生吸附式干燥机组合、冷冻式干燥机与鼓风外加热再生吸附式干燥机组合，由于前两种再生耗气量过高、经济性较差，目前推荐用冷冻式干燥机与鼓风外加热吸附式干燥机组合形式。

冷冻吸附组合式干燥机结合冷冻式干燥机的运行能耗低和吸附式干燥机能达到较低露点的特点，可实现在不同的压力露点要求下的多种组合运行方式，节约运行能耗，为用户提供低再生耗气量和低压力露点的成品气。

（2）适用范围。冷冻吸附组合式干燥机由于压力露点随季节变化有不同要求的工况下，一般适合于排气温度在 60℃以内，全国所有地区条件下的环境温度。

（3）主要技术参数及规格。冷冻式干燥机与鼓风外加热再生吸附式干燥机组合的主要技术参数见表 5-17。

表 5-17　冷冻式干燥机与鼓风外加热再生吸附式干燥机组合的主要参数

| 项　　目 | 数　　值 |
|---|---|
| 循环周期（h） | ＞12 |
| 压力露点（℃） | −40 |
| 再生耗气量（%） | 0～3 |
| 压力损耗（%） | 8 |

（二）过滤器

压缩空气过滤器主要是对压缩空气中含尘、含油等粒子进行过滤处理的装置。

干燥机很少单独使用，需要与过滤器配套使用。典型的干燥机系统是在进气口前和排气口后分别设置过滤器。

1. 后处理系统中过滤器的过滤等级

过滤器处理压缩空气所达到的等级，可根据滤芯处理后固态污染物粒子的尺寸大小、液态水的含量和油分的含量来划分，见表 5-18。

表 5-18　　过滤器处理等级

| 等级 | 过滤器 | 应用范围 |
|---|---|---|
| 9 级 | 分离/过滤器 | 滤除大量液体和≥3μm 的凝聚物（5mg/$m^3$ 最大残留油分含量） |
| 7 级 | 通用送气管线过滤器 | 滤除液态水和油；滤除≥1μm 的固态颗粒（1.0mg/$m^3$ 最大残留油分含量） |
| 5 级 | 高效除油过滤器 | 聚结细小的水汽和油雾；滤除≥0.01μm 的固态颗粒（0.01mg/$m^3$ 最大残留油分含量） |
| 3 级 | 超高效除油过滤器 | 聚结极细小的水汽和油雾；滤除≥0.01μm 的固态颗粒（0.01mg/$m^3$ 最大残留油分含量） |
| 1 级 | 油蒸汽过滤器 | 滤除活性炭通常可吸收的油蒸汽和碳氢化合物蒸汽；滤除≥0.01μm 的固态颗粒（0.003mg/$m^3$ 最大残留油分含量） |

2. 主要技术参数及规格

常用设备参数见表 5-19。

表 5-19 过 滤 器 参 数

| 产品级别 | 名称 | 过滤精度（μm） | 残余油分（$mg/m^3$） | 初期压降（MPa） | 应用范围 |
|---|---|---|---|---|---|
| HC | 主管路过滤器 | 3 | 5 | 0.007 | 冷冻式干燥机的前置过滤 |
| HT | 油雾过滤器 | 1 | 1 | 0.007 | 吸附式干燥机的前后置过滤 |
| HA | 微油雾过滤器 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 前置或后置过滤；对使用喷油螺杆机如精密仪器、喷漆、食品和药物包装及电子制造业提供无油的压缩空气 |
| HF | 高效超精过滤器 | 0.01 | 0.003 | 0.001 | 前置或后置过滤；关键应用场合的无油空气供应，气接触产品的场合 |

## 七、布置设计

1. 总体布置要求

压缩空气站的布置应符合国家现行有关标准规范的规定，如 GB 50029—2014《压缩空气站设计规范》、DL/T 5142—2012《火力发电厂除灰设计技术规程》等。

（1）压缩空气站在厂（矿）内的布置，应根据下列因素，经技术经济方案比较后确定：

1）靠近用气负荷中心；

2）供电、供水合理；

3）有扩建的可能性；

4）避免靠近散发爆炸性、腐蚀性和有毒气体及粉尘等有害物的场所，并宜位于上述场所全年风向最小频率的下风侧。

（2）压缩空气站的朝向，宜使机器间有良好的自然通风，并宜减少西晒。

（3）压缩空气站房宜为独立建筑物。当与其他建筑物毗连或合用时，宜用墙隔开。当布置在多层建筑内时，空气压缩机宜布置在建筑物底层。

2. 内部布置要求

（1）空气压缩机宜采用单列布置。

（2）压缩空气站通道的宽度应根据设备操作、拆装和运输需要确定，空气压缩机站设备间通道净距不宜小于表 5-20 的规定。

表 5-20 压缩空气站设备间通道的净距

| 名 称 | | 空气压缩机排气量（$m^3/min$） | | |
|---|---|---|---|---|
| | | <10 | ≥10，且<40 | ≥40 |
| 设备间通道（m） | 单列布置 | 1.5 | | 2 |
| | 双列布置 | 1.5 | 2.0 | |
| 设备之间或主要设备与辅助设备之间的通道（m） | | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 设备与墙之间的通道（m） | | 0.8 | 1.2 | 1.5 |

（3）单台空气压缩机排气量等于或大于 $20m^3/min$，且总安装容量等于或大于 $60m^3/min$ 的压缩空气站，宜设检修用起重设备，其起重能力，应按空气压缩机组的最重部件确定。

（4）压缩空气站内当需设有专用的检修场地时，空气压缩机台数不多于 6 台时，检修场地面积不宜大于 1 台最大空气压缩机占地和运行所需的面积。空气压缩机台数较多的空气压缩机站应适当增加检修场地面积。

（5）空气压缩机为风冷形式时，应适当增大机组间距。

（6）废油水分离器宜设置在室内；当在室外设置时，应贴近空气压缩机站外墙处。

（7）离心空气压缩机组的设备布置形式，应根据结构和安装现场条件等因素确定。采用双层布置时，应符合下列要求：

1）宜采用满铺运行层形式，底层宜布置辅助设备，运行层机组旁可作检修场；

2）润滑油供油装置宜布置在底层，底盘与主油泵入口高差应符合主油泵吸油高度要求；

3）机器间底层和运行层应有贯穿整个机器间的纵向通道，其净宽不应小于 1.2m，机组旁通道净距应符合压缩机、电动机、冷却器等主要设备的拆装、起重设备的起吊范围、设备基础与建筑物基础的间距等要求；

4）在机器间的扩建端，运行层应留出安装检修吊装孔，当底层设备需采用行车吊装时，其设备上方的运行层也应留有相应的吊装孔；

5）双层布置的离心空气压缩机的基础应与运行层脱开。

（8）平台、扶梯、地坑及吊装孔周围均应设置防护栏杆。栏杆的下部应设防护网或板。

（9）空气压缩机站内的地沟，应能排除积水，并应铺设盖板。

3. 设备布置要求

（1）空气压缩机的布置要求。

1）空气压缩机的冷却水排水管上应装设隔离

阀，冷却水宜回收利用。

2）空气压缩机的吸气口，应设置消声过滤装置，应装在便于维修之处。必要时，应设置平台和扶梯。若吸气口设在室外，应设有防雨措施。

3）积油坑应设置混凝土或钢盖板，盖板上同时应留有人孔，并设置排气管引向室外。

4）寒冷地区，室外的排油水管道，应采取防冻措施。

5）离心空气压缩机应对应设置润滑油供油装置，其出口的供油总管上应设置止回阀。

6）空气压缩机的吸气、排气管道及放空管道的布置，应采取减少管道振动对建筑物影响的措施。

7）离心空气压缩机的进排气管道应设补偿器。

8）离心空气压缩机的吸气口接管应避免直接弯头和连续弯头。

（2）干燥机的安装要求。

1）当空气干燥机设在压缩空气站内时，宜布置在靠辅助间的一端。

2）当用户要求压缩空气湿度等级高于或等于 2 级，或固体颗粒等级高于或等于 2 级时，空气干燥机宜设在用户处。

3）干燥机冷却水排水管上应装设隔离阀，冷却水宜回收利用。

（3）储气罐的布置要求。储气罐是指储存介质为压缩空气的压力容器。

储气罐在压缩空气系统中的功能为：①保持系统的工作气压相对稳定。②在压缩空气系统气源设备故障、系统气压由正常工作压力降至最小工作压力期间，为用气点提供一定时间内的用气。③避免空气压缩机频繁加卸载。

1）压缩空气储气罐应布置在室外或独立建筑内。储气罐布置在室外时，宜布置在建筑物的阴面，如在阳面设置宜加设遮阳棚。立式储气罐与建筑外墙的净距不应小于 1m，并不影响压缩空气站的采光和通风。

2）仪用压缩空气系统的储气罐，其内壁材质宜采用不锈钢。

3）厂用压缩空气从空气压缩机出口连通母管引出处，宜设置专用稳压储气罐，厂用压缩空气系统储气罐在 1 个供气单元内一般配置 1 台，容积和形式也可与单台仪用气储气罐相同。当采用集中空气压缩机站时，宜与除灰用气储气罐容积相同，可用管道阀门连接，兼做除灰储气用。

4）系统中储气罐宜选用立式，以节约占地。

5）对压缩空气负荷波动或要求供气压力稳定的用户，宜就近设置储气罐或其他稳压装置。

6）储气罐罐体上应装设安全阀、人孔门，底部宜设置自动排水设施。

（4）管道的布置要求。

1）设有坡度的管道，其坡度不宜小于 0.002。

2）压缩空气管道应力求短直，主干管应通过用户集中、压缩空气负荷大的区域，但应避开露天堆场和厂房发展用地。

3）埋地管道的埋设深度按以下原则：

a. 应在冰冻线以下，管顶埋深不小于 0.7m。干燥净化压缩空气管道不受此限制。

b. 应在地下水位以上，且管底离地下水位不小于 0.5m。

c. 穿越铁路或道路时宜垂直交叉，困难时交叉角不宜小于 45°。

d. 埋地管道管顶距铁路轨底的垂直距离不应小于 1.2m，距离道路路面结构层底不应小于 0.5m。

e. 穿过铁路、道路的地下管线当不能满足 c、d 要求时，应加防护套管（或管沟），套管（或管沟）两端应伸出铁路路肩或路堤坡脚线外至少 1m，铁路或道路边有排水沟时，则应伸出沟边 1m。

4）架空敷设时，与交通线路的垂直净距不应小于表 5-21 的规定。

**表 5-21　架空压缩空气管道跨越铁路、道路的最小净距**

| 名　称 | 最小垂直净距（m） |
|---|---|
| 铁路（从轨顶算起） | 5.5 |
| 道路（从路面算起） | 5.0 |
| 人行道（从路面算起） | 2.5 |

5）管道支吊架的设置和选型应根据管道系统的总体布置综合分析确定。支吊系统应合理承受管道的动荷载、静荷载和偶然荷载；合理约束管道为宜。确定支架间距时，应考虑管道荷载的合理分布，并满足管道强度、刚度、防止振动和疏放水的要求。

6）压缩空气管道应根据布置情况，在管道的最低位设置放水阀。

7）经后冷却器冷却后的压缩空气温度约为 40℃，不会对周围环境和人体构成威胁，故压缩空气管道一般不必保温，在寒冷和严寒地区架空敷设未经干燥的压缩空气管道时，为了防止管内水分冰冻造成管道、阀门破裂，需采取防冻的保温措施。

8）管道布置安装的其他要求，应符合国家和行业对管道布置安装的统一规定，如 GB 50764—2012《电厂动力管道设计规范》、DL/T 5054《火力发电厂汽水管道设计技术规定》《室内管道支吊架》（05R417-1）等。

## 八、设计举例

某 2×1000MW 燃煤电厂气源系统的设计。

1. 落实工程要求

（1）工程工作环境平均气压为 95.35kPa；工作环境平均气温为 22.0℃，多年极端最低气温为 5.8℃，极端最高气温为 39.5℃。

（2）工程气源系统的用户包括仪用压缩空气、厂用压缩空气、除灰输送用压缩空气。

（3）工程仪用压缩空气、厂用压缩空气、除灰输送用压缩空气统一规划设计，按全厂压缩空气站设置。

（4）工程煤质变化可能性较大。

（5）工程 2 台机组各压缩空气用户气量和空气品质要求，见表 5-22。

表 5-22　　气 源 系 统 用 户 参 数

| 用户 | 耗气量 | 单位 | 品质 | 备注 |
|---|---|---|---|---|
| 厂用压缩空气 $q_c$ | 约 60 | $m^3/min$ | 压力露点：5.8℃；<br>油分含量：＜$12mg/m^3$；<br>含尘粒径：＜5μm；<br>压力：＞0.6MPa | 短时用气 |
| 仪用压缩空气 $q_y$ | 约 66 | $m^3/min$ | 压力露点：比工作环境最低温度低 10℃，即-4.2℃；<br>油分含量：＜$10mg/m^3$；<br>含尘粒径：＜3μm；<br>压力：0.55～0.75MPa | |
| 除灰输送压缩空气 $q_s$ | 约 280 | $m^3/min$ | 压力露点：5.8℃；<br>油分含量：＜$1mg/m^3$；<br>含尘粒径：＜5μm；<br>压力：＞0.45MPa | |

注　表中耗气量是转换到当地自由空气流量和考虑了 1.1 的损耗系数及干燥机的再生耗气量后的耗气量。

2. 系统计算

（1）系统出力计算。已知：$q_y=66m^3/min$，$q_s=280m^3/min$，$q_t=0m^3/min$，则系统总出力为

$$q_z=q_y+q_s+q_t=346\ m^3/min$$

（2）系统耗气量分析。系统出力中的稳定气量为

$$q_d=q_y+0.55q_s=66+154=220m^3/min$$

$$q_b=0.45q_s=126m^3/min$$

（3）系统管道计算。

1）已知：

压缩空气流速 $v$ 取 8～15m/s

仪用压缩空气 FAD 体积流量 $q_y=66m^3/min$

除灰输送用压缩空气 FAD 体积流量 $q_s=280m^3/min$

仪用压缩空气工作压力：0.6MPa

除灰输送用压缩空气工作压力：0.4MPa

2）根据理想气体方程计算得：

仪用压缩空气在工作状态下的体积流量为：$540m^3/h$

除灰输送用压缩空气在工作状态下的体积流量为：$3200m^3/h$

3）仪用压缩空气供气管道内径按式（5-5）计算为

$$d_{yi}=150mm$$

除灰输送用压缩空气供气母管内径按式（5-5）计算为

$$d_{si}=360mm$$

压缩空气系统从空气压缩机出口到最远用气点的压力降应不高于系统工作压力的 10%。

（4）仪用储气罐容积计算。仪用压缩空气系统储气罐的容量，应能维持不小于 5min 运行的耗气量，可按式（5-14）计算为

$$V=174m^3$$

（5）计算所得主要系统参数如表 5-23 所示。

表 5-23　　系 统 主 要 参 数 表

| 序号 | 参数 | 单位 | 参数值 |
|---|---|---|---|
| 1 | 系统排气总出力 | $m^3/min$ | ＞346 |
| 2 | 系统排气压力 | MPa | ≥0.75 |
| 3 | 系统稳定排气量 | $m^3/min$ | 约 220 |
| 4 | 系统波动排气量 | $m^3/min$ | ＞126 |
| 5 | 仪用压缩空气母管管径 | mm | 约 159 |
| 6 | 除灰输送用压缩空气母管管径 | mm | 约 377 |
| 7 | 仪用储气罐总容积 | $m^3$ | ≥168 |

注　气源系统的排气压力按系统中压力最大用户考虑。

3. 完成可行的系统设计方式和系统配置

根据工程要求及表 5-23 中系统设计参数，结合系统和设备选型规则，该工程的气源系统宜采用设全厂

压缩空气站，仪用厂用气源系统与输送用及其他气源系统两者供气设备联合设计、设备集中布置，后处理设备分设，供气母管制，在供气母管上设置止回阀，实现系统分别运行的设计方式。系统配置可有两种方案，如表 5-24 所示。

**表 5-24　　两种方案的系统配置表**

| 项　目 | 系统配置 | | |
|---|---|---|---|
| | 供气设备 | 后处理设备 | 储气罐 |
| 方案 A<br>供气设备全部按螺杆空气压缩机考虑 | $66m^3/min$ 的双级压缩螺杆式空气压缩机 8 台，6 运 2 备（1 台仪用运行备用，1 台系统公共备用） | 仪用压缩空气部分：$80m^3/min$ 的冷冻吸附组合式干燥机 2 台（1 运 1 备）；<br>输送压缩空气部分：$80m^3/min$ 的冷冻式干燥机 6 台，5 运 1 备 | 仪用：$60m^3$ 3 台；<br>厂用：$60m^3$ 1 台；<br>输送用：$60m^3$ 2 台 |
| 方案 B<br>供气设备按螺杆空气压缩机与离心空气压缩机组合考虑 | $120m^3/min$ 离心空气压缩机 3 台，2 运 1 备；$66m^3/min$ 螺杆空气压缩机 4 台，2 运 2 备（1 台仪用运行备用，1 台公共备用） | 选 140 $m^3/min$ 压缩热零排放型吸附式干燥机 3 台，2 台运 1 备；$80m^3/min$ 冷冻吸附组合式干燥机 4 台，2 运 2 备 | 仪用：$60m^3$ 3 台；<br>厂用：$60m^3$ 1 台；<br>输送用：$60m^3$ 2 台 |

4. 通过经济技术比较，确定最优的系统方案

（1）两种系统配置的经济比较见表 5-25。

**表 5-25　　两种方案经济比较　　（万元）**

| 项　目 | | 方案 A | 方案 B |
|---|---|---|---|
| 初投资 | 空气压缩机部分 | 544 | 520 |
| | 后处理部分 | 116 | 201 |
| | 总计 | 660 | 721 |
| 运行费 | 1）空气压缩机部分 | | |
| | 年运行费 | 405.1 | 402.7 |
| | 20 年运行费用折现 | 4275.1 | 4250 |
| | 2）后处理部分 | | |
| | 年运行费 | 15.13 | 10.78 |
| | 20 年运行费用折现 | 159.6 | 113.8 |
| 合计 | 空气压缩机及后处理 20 年运行费用折现总计 | 4434.7 | 4363.8 |

注　年利用小时数按 5000h，20 年折现系数取 10.553，电费按上网电价 0.456 元/kWh。

（2）两种系统配置的技术比较。

方案 A：全部采用螺杆空气压缩机，该配置在电厂中运用最为广泛，系统运行可靠，对气源波动的适应性最强。

方案 B：采用 2 台离心空气压缩机作为常运机，提供相对稳定气源，而螺杆空气压缩机因其调节方便、灵活，运行可靠作为波动气源的运行机，根据气量波动进行调节。该方案对煤质变化和负荷波动适应性比 A 方案低。

（3）比较结论。

通过经济技术比较，A 方案比 B 方案初投资低，在相同平均排气量下运行费用略高，对气源波动及工程煤质变化和负荷波动适应性强。

结合工程情况，除灰系统耗气量受煤质变化情况、机组运行台数、机组运行负荷及运行小时数等诸多不确定因素影响，波动气源下的调节比例较大、适应性要求较高。

最终比较确定，该工程气源系统按方案 A 设计。

系统设置容积流量为 $66m^3/min$，排气压力为 0.75MPa 的空气压缩机 8 台，6 运 2 备，1 台仪用运行备用，1 台除灰备用兼做公共备用及厂用用气空气压缩机。除灰用压缩空气，采用带有前后级过滤器（前置 HC 级，后置 HT 级）的冷冻式干燥机，共设置 6 套，处理气量为 $80m^3/min$，其中 5 套运行，1 套备用，储气罐设置在空气压缩机出口；仪用压缩空气，采用带有前后级过滤器（前置 HC 级，后置 HT 级）的组合式冷冻鼓风外加热吸附干燥机，共设置 2 台，处理气量为 $80m^3/min$，1 台运行，1 台备用。储气罐设置在干燥机出口。后处理装置配前后置过滤器，对压缩空气进行除油、除水、除杂质处理。

具体流程为除灰用空气支管从空气压缩机出口母管引出，通过储气罐后经冷冻式干燥机处理，送往电除尘器附近；仪用压缩空气支管从空气压缩机出口母管引出，至冷冻吸附组合式干燥机，经处理后，送至主厂房。遵循仪用优先原则，母管上设止回阀，见图 5-7。

5. 配合提资

根据气源系统辅助系统设计要求，向相关专业提出配合资料，见表 5-26。

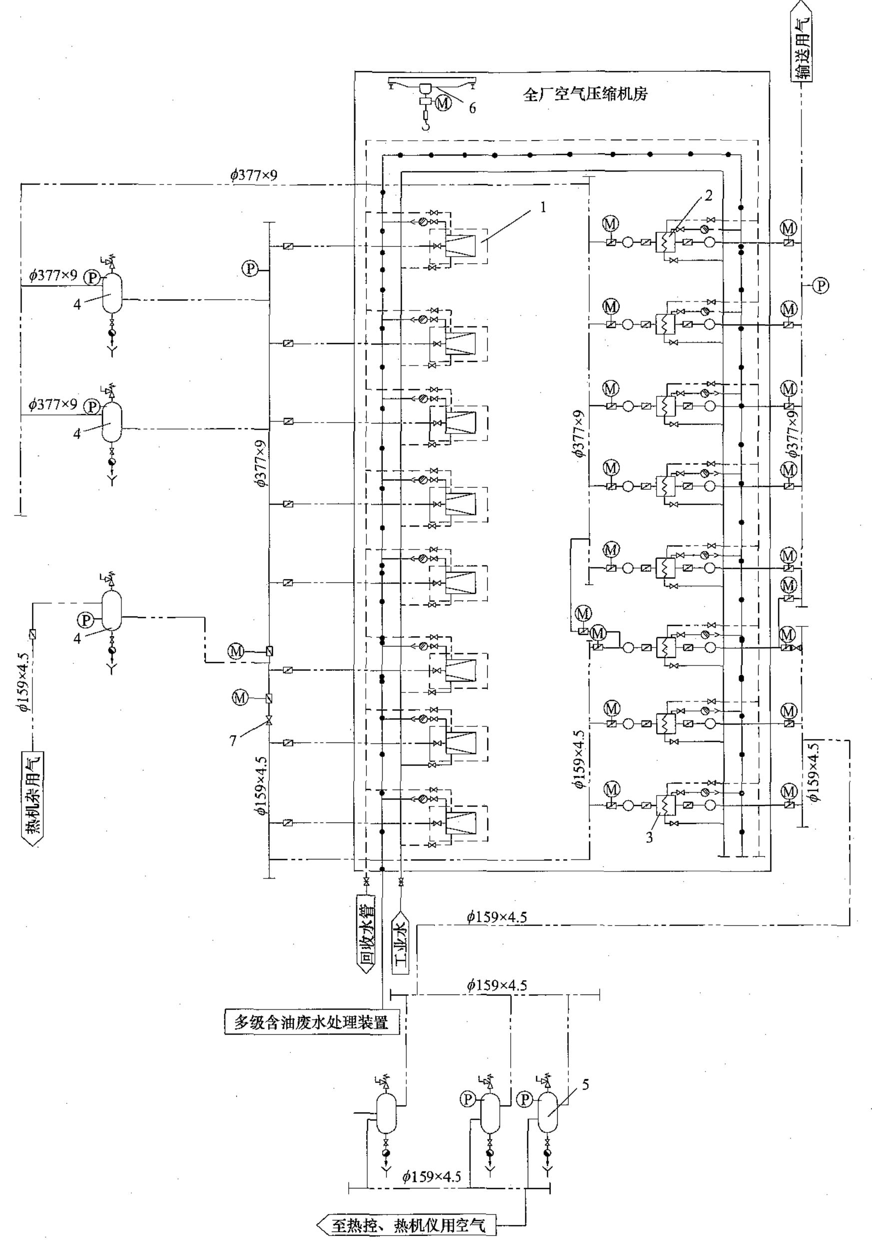



图 5-7 某 2×1000MW 燃煤电厂气源系统流程图

1—空气压缩机；2—冷冻式干燥机；3—冷冻吸附组合式干燥机；4—输送用、厂用储气罐；5—仪用储气罐；6—起重设备；7—止回阀

表 5-26　　配 合 资 料 表

| 接受专业 | 提资内容 | 备注 |
|---|---|---|
| 给水排水 | （1）水冷空气压缩机及后处理的冷却水量和压力、水质要求。<br>（2）空气压缩机房冷却进出水母管接口要求 | 冷却水量可通过设备选型查找，最终由设备厂家提出 |
| 土建 | （1）空气压缩机房位置要求、尺寸要求。<br>（2）空气压缩机房开门要求、起吊设备要求。<br>（3）空气压缩机房设备基础资料 | 设备尺寸可通过设备选型查找，最终由设备厂家提出 |
| 仪表 | （1）空气压缩机及后处理设备联锁要求。<br>（2）空气压缩机房布置资料 | |

6. 完成布置图

（1）空气压缩机房平面布置，如图 5-8 所示。

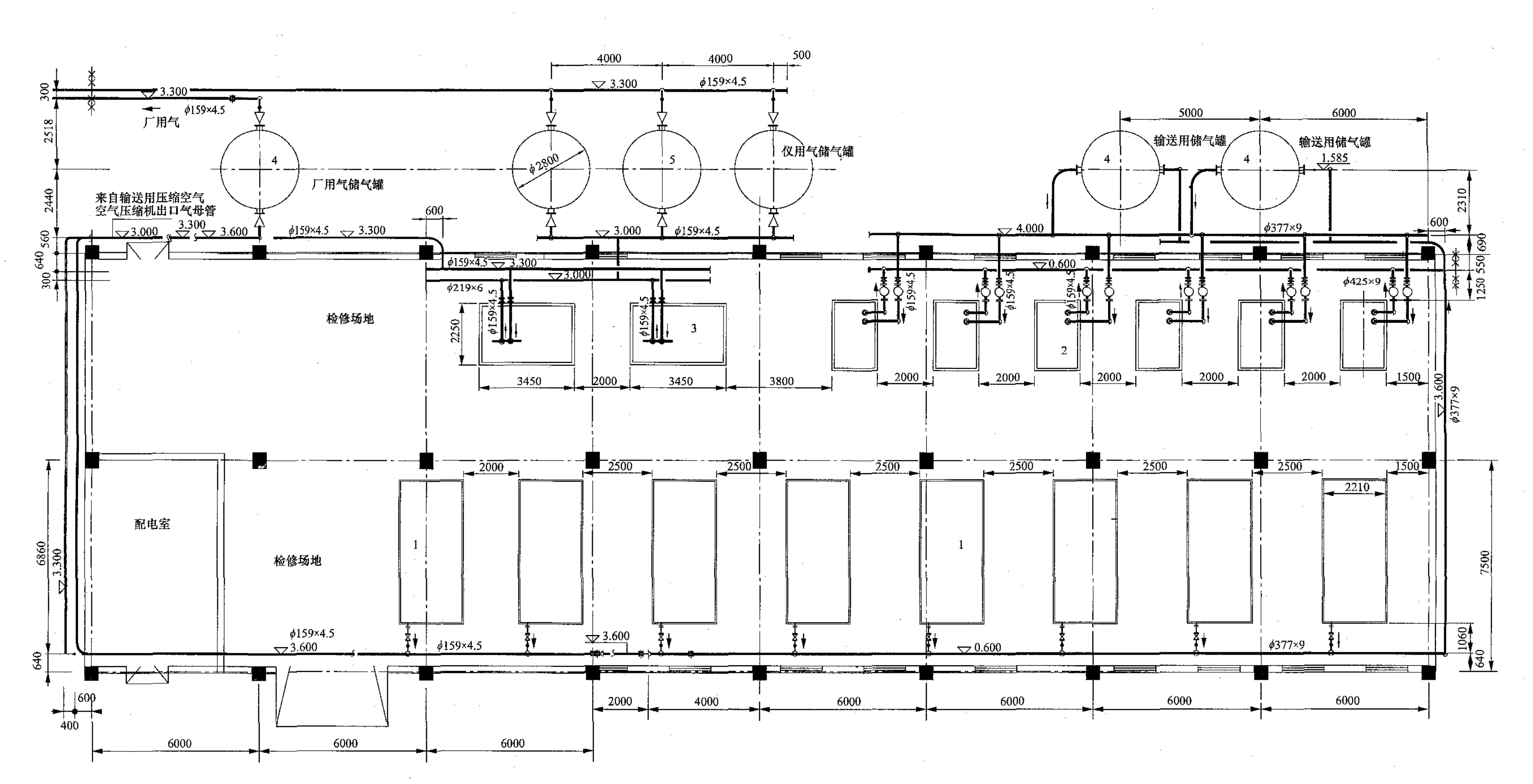



图 5-8　空气压缩机房平面布置图

1—空气压缩机；2—冷冻式干燥机；3—冷冻吸附组合式干燥机；4—输送用、厂用储气罐；5—仪用储气罐

（2）空气压缩机房断面布置，如图5-9所示。

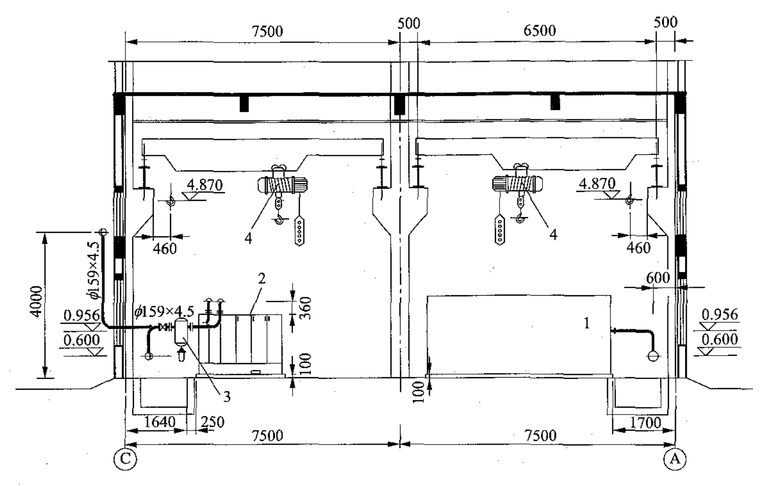



图5-9 空气压缩机房断面布置图

1—空气压缩机；2—冷冻式干燥机；3—过滤器；4—起吊设备

# 第三节 回转式风机和真空泵系统

回转式风机及真空泵系统是指向电厂负压真空的用户提供满足不同要求的负压真空状态的系统，主要为气锁阀等低正压气力输送系统和负压气力输送物料系统提供气源。

## 一、系统简介

当电厂的物料（飞灰、底灰、石子煤）输送采用气锁阀、空气斜槽等低正压气力输送系统时，气源系统中的输送部分应采用回转式风机系统。回转式风机系统主要包括回转式风机及空气输送管网、冷却水系统管网。

当电厂的物料（飞灰、底灰、石子煤）输送采用负压系统时，气源系统中的输送部分应采用真空泵系统。真空泵系统主要包括负压抽气设备、冷却器及负压空气管网、冷却水系统管网。

回转式风机系统及真空泵系统方案的拟定，应根据气锁阀等低正压气力输送系统或负压气力输送系统的设计输入数据，并结合用户的需求情况综合确定适合的系统设计方式和设备配置方案。

## 二、设计要求

1. 系统出力

回转式风机系统及真空泵系统的设计总流量不宜小于气力除灰系统设计出力时计算输送空气量的110%，回转式风机系统的设计风压不宜小于气锁阀等低正压气力输送系统计算阻力的120%，真空泵系统的设计压力不宜大于−65kPa。

2. 系统设备备用设置

在一个气力除灰系统单元内，当同时运行的回转式风机或真空设备台数为1～2台时，宜设1台备用，当同时运行的回转式风机或真空设备台数为3台及以上时，宜设2台备用。

3. 管网设计

输灰管道设计尽量短直，减少输送管道及弯头阻力损失。回转式风机的吸气、排气管道及放空管道的布置，应采取减少管道振动对建筑物影响的措施。抽真空设备排气管应布置在室外。

## 三、设备选型

（一）回转式风机

回转式风机包括罗茨风机和离心风机。回转式风机系统的主要设备是指罗茨风机，离心风机的选型应用参见本书第二章和第七章相关内容。

系统中罗茨风机的类型、型号、台数应根据气源用户对供气量、气源压力等的要求结合表5-27和表5-28选择。

1. 结构形式

罗茨风机是利用两个叶形转子在气缸内做相对运动来压缩和输送气体的回转式风机。罗茨风机由机壳、主机、电动机、进出气口消声器等组成，见图5-10。

罗茨靠转子轴端的同步齿轮使两转子保持啮合，转子上每一凹入的曲面部分与气缸内壁组成工作容积，在转子回转过程中从吸气口带走气体，当移到排气口附近与排气口相连通的瞬时，因有较高压力的气体回流，这时工作容积中的压力升高，然后将气体输送到排气通道。两转子依次交替工作。工作流程见图5-11。

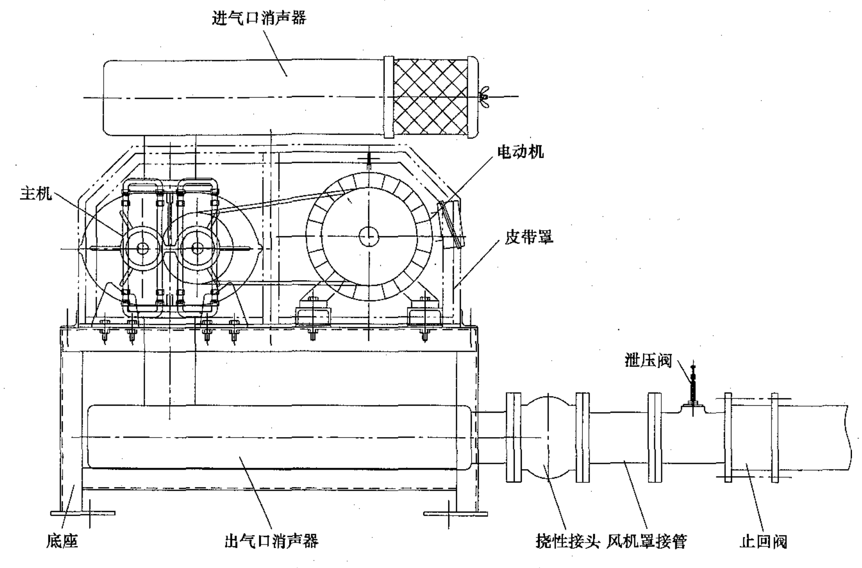



图 5-10　罗茨风机外形示意图

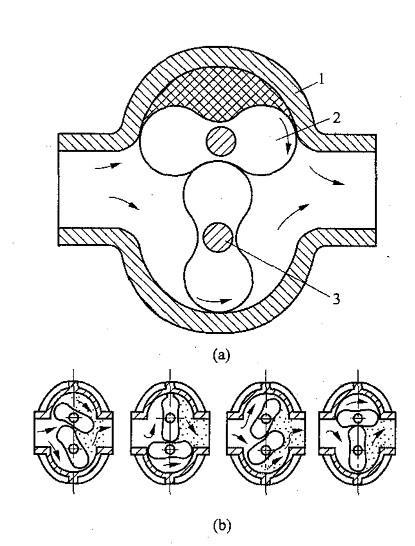



图 5-11　罗茨风机工作原理图及工作流程图
（a）罗茨风机结构；（b）罗茨风机工作过程
1—机壳；2—腰形转子；3—传动轴

2. 分类

（1）罗茨风机按工作方式的不同可分为单级罗茨风机和双级罗茨风机。

1）单级罗茨风机。是指有一个压缩级的罗茨风机。

2）多级罗茨风机。是指将两台单级罗茨风机串联起来，对气体连续进行两次压缩的罗茨风机。

（2）按转子叶轮头数可分为两叶罗茨风机和三叶罗茨风机。

1）两叶罗茨风机。风机转子每转动一次由两个转子进行两次吸、排气，见图 5-11。

2）三叶罗茨风机。风机转子每转动一次由两个转子进行三次吸、排气，见图 5-12。

三叶罗茨风机与两叶罗茨风机相比，气体脉动性小，振动也小，噪声低。

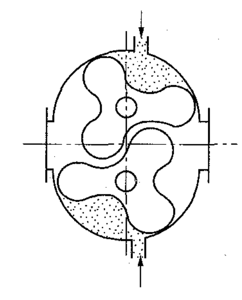


图 5-12　三叶罗茨风机

（3）按传动方式可分为直连罗茨风机和带连罗茨风机。

1）带连罗茨风机，即风机通过皮带与电动机相连，可以通过调节皮带轮影响转速，从而调节风机的流量及压力；但皮带不耐高温，易出现打滑、断带。

2）直连罗茨风机电动机和风机通过联轴器相连，风机转速固定，能适应高温环境。

（4）按冷却方式可分为空冷罗茨风机、水冷罗茨风机。

（5）按结构形式可分为立式罗茨风机、卧式罗茨风机。

3. 适用范围

罗茨风机的排气量一般为 0.15～150m³/min，转速为 150～3000r/min，单级压缩比通常小于 1.7，最高可达 2.1，可以双级串联使用，适用于低正压场合的气体输送。

4. 主要技术参数及规格

常用罗茨风机性能参数可参考表 5-27 和表 5-28。设计时应根据实际工程进行校核验算。

表 5-27 **BK** 系列三叶罗茨风机参数

| 型号 | 排风口径[mm(in)] | 转速 | 不同压力下的吸入口风量（$m^3$/min）及轴功率（kW） | | | | | | | | | | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $0.6kgf/cm^2$ | | $0.7kgf/cm^2$ | | $0.8kgf/cm^2$ | | $0.9kgf/cm^2$ | | $1.0kgf/cm^2$ | | |
| | | | $6000mmH_2O$ | | $7000mmH_2O$ | | $8000mmH_2O$ | | $9000mmH_2O$ | | $10000mmH_2O$ | | |
| | | | 0.06MPa | | 0.07MPa | | 0.08MPa | | 0.09MPa | | 0.1MPa | | |
| | | r/min | $m^3$/min | kW | $m^3$/min | kW | $m^3$/min | kW | $m^3$/min | kW | $m^3$/min | kW | L/min |
| BKW5003 | 65(2.5) | 1000 | 2.38 | 4.68 | 2.25 | 5.56 | | | | | | | 4 |
| | | 1150 | 2.98 | 5.38 | 2.85 | 6.39 | 2.73 | 7.21 | 2.61 | 8.03 | | | |
| | | 1250 | 3.38 | 5.85 | 3.25 | 6.95 | 3.13 | 7.84 | 3.01 | 8.73 | | | |
| | | 1350 | 3.79 | 6.32 | 3.65 | 7.51 | 3.53 | 8.47 | 3.42 | 9.42 | | | |
| | | 1500 | 4.39 | 7.02 | 4.26 | 8.34 | 4.14 | 9.41 | 4.02 | 10.47 | 3.91 | 11.54 | |
| | | 1600 | 4.79 | 7.49 | 4.66 | 8.90 | 4.54 | 10.03 | 4.42 | 11.17 | 4.31 | 12.30 | |
| | | 1750 | 5.40 | 8.19 | 5.26 | 9.73 | 5.14 | 10.97 | 5.03 | 12.22 | 4.92 | 13.46 | |
| | | 1850 | 5.80 | 8.66 | 5.67 | 10.29 | 5.54 | 11.60 | 5.43 | 12.91 | 5.32 | 14.23 | |
| | | 2000 | 6.40 | 9.36 | 6.27 | 11.12 | 6.15 | 12.54 | 6.03 | 13.96 | 5.92 | 15.38 | |
| BKW5006 | 100(4) | 850 | 3.28 | 6.44 | 3.08 | 7.27 | | | | | | | 6 |
| | | 1000 | 4.29 | 7.58 | 4.09 | 8.55 | 3.91 | 9.69 | 3.73 | 10.83 | | | |
| | | 1150 | 5.31 | 8.72 | 5.10 | 9.83 | 4.93 | 11.15 | 4.74 | 12.46 | | | |
| | | 1250 | 5.98 | 9.47 | 5.78 | 10.69 | 5.60 | 12.12 | 5.42 | 13.54 | | | |
| | | 1350 | 6.66 | 10.23 | 6.45 | 11.55 | 6.28 | 13.09 | 6.10 | 14.63 | 5.94 | 16.17 | |
| | | 1500 | 7.67 | 11.37 | 7.47 | 12.83 | 7.29 | 14.54 | 7.11 | 16.25 | 6.95 | 17.96 | |
| | | 1600 | 8.35 | 12.13 | 8.14 | 13.68 | 7.97 | 15.51 | 7.79 | 17.33 | 7.63 | 19.16 | |
| | | 1750 | 9.36 | 13.26 | 9.16 | 14.97 | 8.98 | 16.96 | 8.80 | 18.96 | 8.64 | 20.96 | |
| | | 1850 | 10.04 | 14.02 | 9.83 | 15.82 | 9.66 | 17.93 | 9.48 | 20.04 | 9.32 | 22.15 | |
| | | 2000 | 11.05 | 15.16 | 10.85 | 17.10 | 10.67 | 19.39 | 10.49 | 21.67 | 10.33 | 23.95 | |
| BKW6005 | 80(3) | 850 | 3.84 | 7.28 | 3.62 | 8.20 | | | | | | | 5 |
| | | 1000 | 5.00 | 8.56 | 4.77 | 9.65 | 4.58 | 10.94 | 4.38 | 12.24 | | | |
| | | 1150 | 6.15 | 9.84 | 5.93 | 11.09 | 5.74 | 12.59 | 5.54 | 14.08 | | | |
| | | 1250 | 6.92 | 10.70 | 6.70 | 12.06 | 6.50 | 13.68 | 6.30 | 15.30 | 6.14 | 16.92 | |
| | | 1400 | 8.07 | 11.98 | 7.85 | 13.51 | 7.66 | 15.32 | 7.46 | 17.14 | 7.29 | 18.95 | |
| | | 1500 | 8.84 | 12.84 | 8.62 | 14.47 | 8.43 | 16.42 | 8.23 | 18.36 | 8.06 | 20.31 | |
| | | 1650 | 9.99 | 14.12 | 9.77 | 15.92 | 9.58 | 18.06 | 9.38 | 20.20 | 9.21 | 22.34 | |
| | | 1800 | 11.15 | 15.41 | 10.92 | 17.36 | 10.73 | 19.70 | 10.53 | 22.04 | 10.36 | 24.37 | |
| BKW6008 | 125(5) | 850 | 6.69 | 11.44 | 6.38 | 12.85 | | | | | | | 8 |
| | | 1000 | 8.53 | 13.46 | 8.23 | 15.11 | 7.96 | 17.19 | 7.68 | 19.27 | | | |
| | | 1150 | 10.38 | 15.48 | 10.07 | 17.38 | 9.80 | 19.77 | 9.53 | 22.16 | 9.29 | 24.55 | |
| | | 1250 | 11.61 | 16.82 | 11.30 | 18.89 | 11.03 | 21.49 | 10.76 | 24.09 | 10.52 | 26.68 | |
| | | 1400 | 13.46 | 18.84 | 13.15 | 21.16 | 12.88 | 24.07 | 12.61 | 29.98 | 12.36 | 29.89 | |
| | | 1500 | 14.69 | 20.19 | 14.38 | 22.67 | 14.11 | 25.79 | 13.84 | 28.90 | 13.60 | 32.02 | |
| | | 1650 | 16.54 | 22.21 | 16.23 | 24.94 | 15.96 | 28.36 | 15.69 | 31.79 | 15.44 | 35.22 | |
| | | 1800 | 18.39 | 24.22 | 18.08 | 27.20 | 17.81 | 30.94 | | | | | |

续表

| 型号 | 排风口径［mm(in)］ | 转速 | 不同压力下的吸入口风量（m$^3$/min）及轴功率（kW） | | | | | | | | | | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0.6kgf/cm$^2$ | | 0.7kgf/cm$^2$ | | 0.8kgf/cm$^2$ | | 0.9kgf/cm$^2$ | | 1.0kgf/cm$^2$ | | |
| | | | 6000mmH$_2$O | | 7000mmH$_2$O | | 8000mmH$_2$O | | 9000mmH$_2$O | | 10000mmH$_2$O | | |
| | | | 0.06MPa | | 0.07MPa | | 0.08MPa | | 0.09MPa | | 0.1MPa | | |
| | | r/min | m$^3$/min | kW | m$^3$/min | kW | m$^3$/min | kW | m$^3$/min | kW | m$^3$/min | kW | L/min |
| | | 700 | 5.17 | 9.94 | 4.89 | 11.52 | 4.64 | 13.09 | 4.40 | 13.56 | | | |
| | | 850 | 7.00 | 12.07 | 6.72 | 13.98 | 6.48 | 15.90 | 6.23 | 16.46 | 6.01 | 18.35 | |
| | | 1000 | 8.83 | 14.20 | 8.55 | 16.45 | 8.31 | 18.70 | 8.06 | 19.37 | 7.84 | 21.59 | |
| BKW7006 | 100(4) | 1150 | 10.67 | 16.33 | 10.39 | 18.92 | 10.14 | 21.51 | 9.90 | 22.27 | 9.68 | 24.83 | 6 |
| | | 1250 | 11.89 | 17.75 | 11.61 | 20.57 | 11.36 | 23.38 | 11.12 | 24.21 | 10.90 | 26.90 | |
| | | 1400 | 13.72 | 19.88 | 13.44 | 23.03 | 13.20 | 26.18 | 12.95 | 27.11 | 12.73 | 30.23 | |
| | | 1500 | 14.94 | 21.30 | 14.66 | 24.68 | 14.42 | 28.05 | 14.17 | 29.05 | 13.95 | 32.38 | |
| | | 700 | 10.45 | 17.83 | 10.02 | 19.00 | | | | | | | |
| | | 850 | 13.81 | 21.65 | 13.39 | 23.07 | 13.01 | 26.28 | 12.65 | 29.64 | 12.29 | 32.85 | |
| | | 1000 | 17.18 | 25.47 | 16.75 | 27.14 | 16.37 | 30.92 | 16.01 | 34.87 | 15.65 | 38.65 | |
| BKW7011 | 150(6) | 1150 | 20.54 | 29.30 | 20.11 | 31.21 | 19.73 | 35.56 | 19.37 | 40.10 | 19.02 | 44.45 | 10 |
| | | 1250 | 22.78 | 31.84 | 22.36 | 33.92 | 21.98 | 38.65 | 21.62 | 43.58 | 21.26 | 48.31 | |
| | | 1400 | 26.15 | 35.66 | 25.72 | 37.99 | 25.34 | 43.29 | 24.98 | 48.81 | 24.62 | 54.11 | |
| | | 1500 | 28.39 | 38.21 | 27.96 | 40.70 | 27.58 | 46.68 | 27.22 | 52.30 | 26.86 | 57.97 | |
| | | 700 | 15.37 | 26.60 | 14.63 | 30.77 | | | | | | | |
| | | 850 | 20.64 | 32.31 | 19.90 | 37.36 | | | | | | | |
| | | 1000 | 25.92 | 38.01 | 25.18 | 43.96 | 24.51 | 49.90 | 23.84 | 55.85 | 23.25 | 61.80 | |
| BKW8016 | 200(8) | 1150 | 31.19 | 43.71 | 30.45 | 50.55 | 29.79 | 57.39 | 29.12 | 64.23 | 28.52 | 71.07 | 15 |
| | | 1250 | 34.71 | 47.51 | 33.97 | 54.94 | 33.30 | 62.38 | 32.63 | 69.82 | 32.04 | 77.25 | |
| | | 1400 | 39.98 | 53.21 | 39.25 | 61.54 | 38.58 | 69.87 | 37.91 | 78.19 | 37.31 | 86.52 | |
| | | 1500 | 43.50 | 57.01 | 42.76 | 65.93 | 42.09 | 74.86 | 41.43 | 83.78 | 40.83 | 92.70 | |
| | | 700 | 23.85 | 39.10 | 22.74 | 47.51 | | | | | | | |
| | | 850 | 31.76 | 47.48 | 30.65 | 55.06 | | | | | | | |
| | | 1000 | 39.67 | 55.86 | 38.56 | 64.78 | 37.67 | 73.70 | | | | | |
| BKW8024 | 250(10) | 1150 | 47.59 | 64.24 | 46.48 | 74.50 | 45.58 | 84.76 | | | | | 20 |
| | | 1250 | 52.86 | 69.82 | 51.75 | 80.98 | 50.86 | 92.13 | | | | | |
| | | 1400 | 60.77 | 78.20 | 59.67 | 90.69 | 58.77 | 103.19 | | | | | |
| | | 1500 | 66.05 | 83.78 | 64.94 | 97.17 | 64.05 | 110.56 | | | | | |
| | | 700 | 26.99 | 42.76 | 25.89 | 46.92 | | | | | | | |
| | | 850 | 35.68 | 51.93 | 34.58 | 60.26 | | | | | | | |
| | | 1000 | 44.36 | 61.09 | 43.26 | 70.89 | 42.28 | 80.68 | 41.35 | 90.48 | 40.42 | 100.28 | |
| BKW9020 | 250(10) | 1150 | 53.05 | 70.26 | 51.95 | 81.52 | 50.97 | 92.79 | 50.04 | 104.05 | 49.11 | 115.32 | 20 |
| | | 1250 | 58.84 | 76.37 | 57.74 | 88.61 | 56.76 | 100.86 | 55.83 | 113.10 | 54.90 | 125.35 | |
| | | 1400 | 67.53 | 85.53 | 66.43 | 99.24 | 65.44 | 112.96 | 64.52 | 126.67 | 63.59 | 140.39 | |
| | | 1500 | 73.32 | 91.64 | 72.22 | 106.33 | 71.24 | 121.03 | 70.31 | 135.72 | 69.38 | 150.42 | |

续表

| 型号 | 排风口径[mm(in)] | 转速 | 不同压力下的吸入口风量（$m^3/min$）及轴功率（kW） | | | | | | | | | | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0.6kgf/cm² | | 0.7kgf/cm² | | 0.8kgf/cm² | | 0.9kgf/cm² | | 1.0kgf/cm² | | |
| | | | 6000mm$H_2O$ | | 7000mm$H_2O$ | | 8000mm$H_2O$ | | 9000mm$H_2O$ | | 10000mm$H_2O$ | | |
| | | | 0.06MPa | | 0.07MPa | | 0.08MPa | | 0.09MPa | | 0.1MPa | | |
| | | r/min | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | L/min |
| BKW9030 | 300(12) | 700 | 41.79 | 63.34 | 40.22 | 73.63 | | | | | | | 25 |
| | | 850 | 54.82 | 76.91 | 53.26 | 89.40 | | | | | | | |
| | | 1000 | 67.85 | 90.49 | 66.29 | 105.18 | 64.90 | 119.88 | | | | | |
| | | 1150 | 80.88 | 104.06 | 79.32 | 120.96 | 77.93 | 137.86 | | | | | |
| | | 1250 | 89.57 | 113.11 | 88.01 | 131.48 | 86.62 | 149.84 | | | | | |
| | | 1400 | 102.60 | 126.68 | 101.04 | 147.25 | 99.65 | 167.83 | | | | | |
| | | 1500 | 111.29 | 135.73 | 109.73 | 157.77 | 108.34 | 179.81 | | | | | |
| BKW10027 | 300(12) | 850 | 57.41 | 81.29 | 55.77 | 94.33 | | | | | | | 25 |
| | | 900 | 67.04 | 91.45 | 65.41 | 106.12 | | | | | | | |
| | | 1000 | 76.68 | 101.62 | 75.04 | 117.91 | 73.59 | 134.20 | 72.15 | 150.49 | 70.90 | 166.79 | |
| | | 1100 | 86.31 | 111.78 | 84.67 | 129.70 | 83.23 | 147.62 | 81.78 | 165.54 | 80.53 | 183.47 | |
| | | 1250 | 100.76 | 127.02 | 99.12 | 147.39 | 97.67 | 167.75 | 96.23 | 188.12 | 94.98 | 208.48 | |
| | | 1400 | 115.21 | 142.26 | 113.57 | 165.07 | 112.12 | 187.88 | 110.68 | 210.69 | 109.43 | 233.50 | |
| BKW10034 | 350(14) | 850 | 74.05 | 101.64 | 72.23 | 118.07 | | | | | | | 30 |
| | | 900 | 86.18 | 114.35 | 84.36 | 132.82 | | | | | | | |
| | | 1000 | 98.32 | 127.05 | 96.50 | 147.58 | 94.80 | 168.12 | | | | | |
| | | 1100 | 110.46 | 139.76 | 108.64 | 162.34 | 106.94 | 184.93 | | | | | |
| | | 1250 | 128.67 | 158.81 | 126.85 | 184.48 | 125.15 | 210.14 | | | | | |
| | | 1400 | 146.88 | 177.87 | 145.06 | 206.62 | 143.36 | 235.36 | | | | | |

**表 5-28　　BK 系列双级三叶罗茨风机参数**

| 型号 | 适用风机 | 排风口径[mm(in)] | 转速 | | 不同压力下的吸入口风量（$m^3/min$）及轴功率（kW） | | | | | | | | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1.0kgf/cm² | | 1.2kgf/cm² | | 1.4kgf/cm² | | 1.5kgf/cm² | | |
| | | | | | 10000mm$H_2O$ | | 12000mm$H_2O$ | | 14000mm$H_2O$ | | 15000mm$H_2O$ | | |
| | | | r/min | | 0.098MPa | | 0.118MPa | | 0.137MPa | | 0.147MPa | | |
| | | | Ⅰ | Ⅱ | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | L/min |
| BKD-1000 | BKW5006 + BKW5003 | 65(2.5) | 850 | 1050 | 3.52 | 10.18 | 3.35 | 11.53 | 3.21 | 12.74 | 3.16 | 13.54 | 32 |
| | | | 1000 | 1200 | 4.49 | 11.80 | 4.32 | 13.37 | 4.17 | 14.76 | 4.13 | 15.68 | |
| | | | 1150 | 1350 | 5.45 | 13.42 | 5.28 | 15.20 | 5.14 | 16.78 | 5.09 | 17.83 | |
| | | | 1250 | 1450 | 6.10 | 14.50 | 5.93 | 16.42 | 5.78 | 18.13 | 5.74 | 19.26 | |
| | | | 1350 | 1550 | 6.74 | 15.58 | 6.57 | 17.64 | 6.42 | 19.47 | 6.38 | 20.69 | |
| | | | 1500 | 1700 | 7.71 | 17.20 | 7.54 | 19.48 | 7.39 | 21.50 | 7.34 | 22.83 | |
| | | | 1600 | 1800 | 8.35 | 18.28 | 8.18 | 20.70 | 8.03 | 22.84 | 7.99 | 24.26 | |

续表

| 型号 | 适用风机 | 排风口径[mm(in)] | 转速 | | 不同压力下的吸入口风量（$m^3/min$）及轴功率（kW） | | | | | | | | 冷却水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1.0kgf/cm² | | 1.2kgf/cm² | | 1.4kgf/cm² | | 1.5kgf/cm² | | |
| | | | | | 10000mm$H_2O$ | | 12000mm$H_2O$ | | 14000mm$H_2O$ | | 1500mm$H_2O$ | | |
| | | | r/min | | 0.098MPa | | 0.118MPa | | 0.137MPa | | 0.147MPa | | |
| | | | Ⅰ | Ⅱ | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | $m^3/min$ | kW | L/min |
| BKD-2000 | BKW6008 + BKW6005 | 80(3) | 850 | 850 | 6.42 | 16.43 | 6.11 | 18.33 | 5.84 | 20.73 | 5.76 | 22.04 | 40 |
| | | | 1000 | 1000 | 8.17 | 19.33 | 7.87 | 21.57 | 7.60 | 24.39 | 7.52 | 25.92 | |
| | | | 1150 | 1150 | 9.93 | 22.22 | 9.63 | 24.80 | 9.36 | 28.05 | 9.28 | 29.81 | |
| | | | 1250 | 1250 | 11.11 | 24.16 | 10.80 | 26.96 | 10.53 | 30.49 | 10.45 | 32.40 | |
| | | | 1400 | 1400 | 12.87 | 27.06 | 12.56 | 30.19 | 12.29 | 34.14 | 12.21 | 36.29 | |
| | | | 1500 | 1500 | 14.04 | 28.99 | 13.73 | 32.35 | 13.46 | 36.58 | 13.38 | 38.89 | |
| BKD-3000 | BKW7011 + BKW7006 | 100(4) | 850 | 1000 | 14.03 | 30.21 | 13.67 | 34.42 | 13.35 | 38.17 | 13.26 | 40.59 | 50 |
| | | | 1000 | 1150 | 17.23 | 35.16 | 16.87 | 40.05 | 16.55 | 44.40 | 16.47 | 47.21 | |
| | | | 1150 | 1300 | 20.44 | 40.11 | 20.07 | 45.68 | 19.75 | 50.64 | 19.67 | 53.83 | |
| | | | 1250 | 1400 | 22.57 | 43.40 | 22.21 | 49.43 | 21.89 | 54.80 | 21.80 | 58.24 | |
| | | | 1400 | 1550 | 25.78 | 48.35 | 25.41 | 55.06 | 25.09 | 61.04 | 25.01 | 64.86 | |
| | | | 1500 | 1650 | 27.91 | 51.65 | 27.55 | 58.82 | 27.23 | 65.19 | 27.14 | 69.27 | |
| BKD-4000 | BKW8016 + BKW7011 | 150(6) | 850 | 850 | 21.07 | 49.28 | 20.05 | 55.99 | 19.62 | 61.95 | 19.10 | 62.93 | 70 |
| | | | 1000 | 1000 | 26.34 | 57.98 | 25.32 | 65.87 | 24.90 | 72.88 | 24.37 | 74.03 | |
| | | | 1150 | 1150 | 31.62 | 66.68 | 30.60 | 75.75 | 30.17 | 83.81 | 29.65 | 85.14 | |
| | | | 1250 | 1250 | 35.13 | 72.48 | 34.11 | 82.33 | 33.69 | 91.10 | 33.16 | 92.54 | |
| | | | 1400 | 1400 | 40.41 | 81.17 | 39.39 | 92.21 | 38.97 | 102.03 | 38.44 | 103.64 | |
| BKD-5000 | BKW8024 + BKW8016 | 200(8) | 850 | 850 | 32.23 | 77.31 | 30.76 | 87.89 | 30.07 | 93.06 | 29.44 | 94.45 | 90 |
| | | | 1000 | 1000 | 40.15 | 90.96 | 38.67 | 103.40 | 37.98 | 109.49 | 37.35 | 111.11 | |
| | | | 1150 | 1150 | 48.06 | 104.60 | 46.58 | 118.91 | 45.90 | 125.91 | 45.26 | 127.78 | |
| | | | 1250 | 1250 | 53.34 | 113.69 | 51.86 | 129.25 | 51.17 | 136.86 | 50.54 | 138.89 | |
| | | | 1400 | 1400 | 61.25 | 127.34 | 59.77 | 144.75 | 59.09 | 153.28 | 58.45 | 155.36 | |
| BKD-6000 | BKW9030 + BKW9020 | 250 (10) | 850 | 850 | 55.17 | 124.29 | 53.00 | 141.82 | 51.95 | 150.59 | 51.00 | 152.99 | 120 |
| | | | 1000 | 1000 | 68.20 | 146.22 | 66.03 | 166.83 | 64.98 | 177.17 | 64.03 | 179.99 | |
| | | | 1150 | 1150 | 81.23 | 168.15 | 79.06 | 191.88 | 78.02 | 203.74 | 77.06 | 206.98 | |
| | | | 1250 | 1250 | 89.92 | 182.77 | 87.75 | 208.56 | 86.70 | 221.46 | 85.75 | 224.98 | |
| | | | 1400 | 1400 | 102.95 | 204.71 | 100.78 | 233.59 | 99.74 | 248.03 | 98.78 | 251.98 | |
| BKD-7000 | BKW10034 + BKW10027 | 300 (12) | 850 | 850 | 79.99 | 175.16 | 77.20 | 199.32 | 75.87 | 220.55 | 74.77 | 232.57 | 160 |
| | | | 1000 | 1000 | 98.20 | 206.07 | 95.41 | 234.49 | 94.07 | 259.47 | 92.98 | 273.61 | |
| | | | 1100 | 1100 | 110.34 | 226.68 | 107.55 | 257.94 | 106.21 | 285.42 | 105.12 | 300.97 | |
| | | | 1250 | 1250 | 128.55 | 257.59 | 125.76 | 293.12 | 124.42 | 324.34 | 123.33 | 342.01 | |
| | | | 1400 | 1400 | 146.76 | 288.50 | 143.96 | 328.29 | 142.63 | 363.26 | 141.54 | 383.05 | |

注　该风机第一级和第二级之间没有中间冷却器，第二级进口处的气温控制在45℃。

（二）负压抽气设备

负压气力输送系统抽气设备，主要是罗茨式负压风机及水环式真空泵。

系统中负压抽气设备的类型、台数应根据气源用户对供气量、气源真空度等的要求结合表 5-28 和表 5-29 选择。

1. 水环式真空泵

（1）结构形式。水环式真空泵又称为水环泵，是以水为工作液，利用泵腔容积的变化来实现吸气、压缩和排气的一种变容式真空泵。

在泵的壳体内注入一定量的水，叶轮装在壳体内的位置是偏心的，当叶轮旋转时，水受离心力作用被甩到四周，而形成一个相对于叶轮为偏心的封闭水环。被抽吸的气体，从泵的吸入孔进入水环与叶轮之间的空间，由于叶轮的旋转，这个空间的容积由小逐渐增大（见图 5-13 A-B-C 过程），因而产生真空。随着叶轮的旋转，气体进入泵的左边，此时叶轮与水环之间的空间容积逐渐缩小（见图 5-13 C-D-A 过程），气体逐渐受到压缩，然后经泵的排气孔排出引至气水分离箱内。空气从分离箱的顶部排气管排至大气，水环式真空泵装置示意图如图 5-13 所示。

当水环式真空泵运行时，需不断向泵壳内补给水，使泵壳内的水不断流动，以便使水环保持一定的体积，并带走泵壳内的热量，使泵内流体的温度不超过 50℃。水环式真空泵需有相应的补给水设备。同时还要考虑从泵内排废水的处理设施。水环式真空泵消耗大，效率较低（为 30%～50%）。

（2）适用范围。水环式真空泵可达极限真空 2000～4000Pa，适用于抽除含尘、含水的气体，可作为负压气力输送系统的抽气设备。

（3）主要技术参数及规格。用于负压气力输送系统的水环式真空泵，国产有 SK 型水环式真空泵和引进德国西门子公司技术开发的节能产品 2BE1 型水环式真空泵。

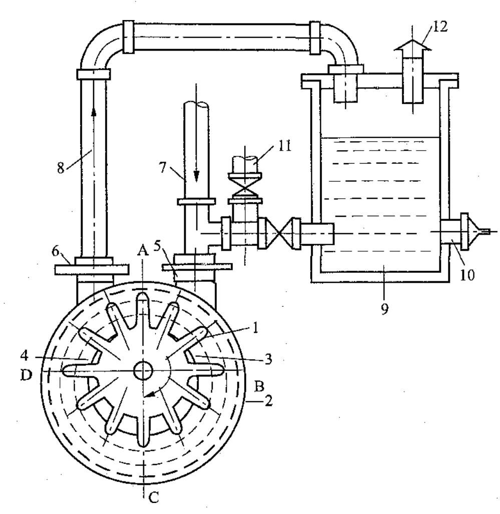



图 5-13　水环式真空泵

1—叶轮；2—泵；3—吸气孔；4—排气孔；5、6—接头；7—吸气管；8—排气管；9—水箱；10—溢流管接头；11—管；12—放气管

SK 型水环式真空泵的性能参数见表 5-29（表中 $1mmHg=1.3332\times10^2Pa$）。设计时根据实际工程校核验算。

水环式真空泵参考安装尺寸见图 5-14 及表 5-30。

2. 负压罗茨风机

罗茨风机排气口与用气系统相连时，用作低正压气力除灰系统的供气设备；罗茨风机吸气口与用气系统相连时，用作负压气力除灰系统的抽气设备，也称为负压罗茨风机或罗茨真空泵。

（1）负压罗茨风机的特点。

1）与水环式真空泵相比，不存在“排气带水”问题。

2）运行时噪声较大，在进出口一般均需装设消声器。在高真空工况下，叶片间隙漏风加剧，使输送空气量下降，易造成堵管。

（2）主要技术参数及规格见表 5-31。设计时应根据实际工程进行校核验算。

表 5-29　　SK 型水环式真空泵的性能参数

| 型号 | 气量（$m^3/min$） | | | | | | 极限真空（mmHg） | 转速（r/min） | 电动机功率（kW） | 供水量（L/min） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 吸入压力（mmHg） | | | | | | | | | |
| | −760～0 | −460～−300 | −400～−360 | −450～−310 | −500～−260 | −600～−160 | | | | |
| SK-12 | 12.0 | 11.4 | 11.0 | 10.7 | 10 | 8 | −710 | 970 | 22 | 70 |
| SK-27 | 27.0 | 25.8 | 25.4 | 25.0 | 24.9 | 18 | −650 | 490 | 40 | 140 |
| SK-42 | 42.0 | 40.7 | 40.2 | 40.0 | 38.5 | 28 | −670 | 470 | 55 | 150 |
| SK-60 | 60.0 | 57.3 | 56.5 | 55.7 | 53.5 | 40 | −650 | 420 | 95 | 160 |
| SK-85 | 85.0 | 82.0 | 81.0 | 77.5 | 71.0 | 54.5 | −650 | 365 | 130 | 180 |
| SK-120 | 120.0 | 116.0 | 113.0 | 108.0 | 98.5 | 81 | −640 | 250 | 185 | 200 |

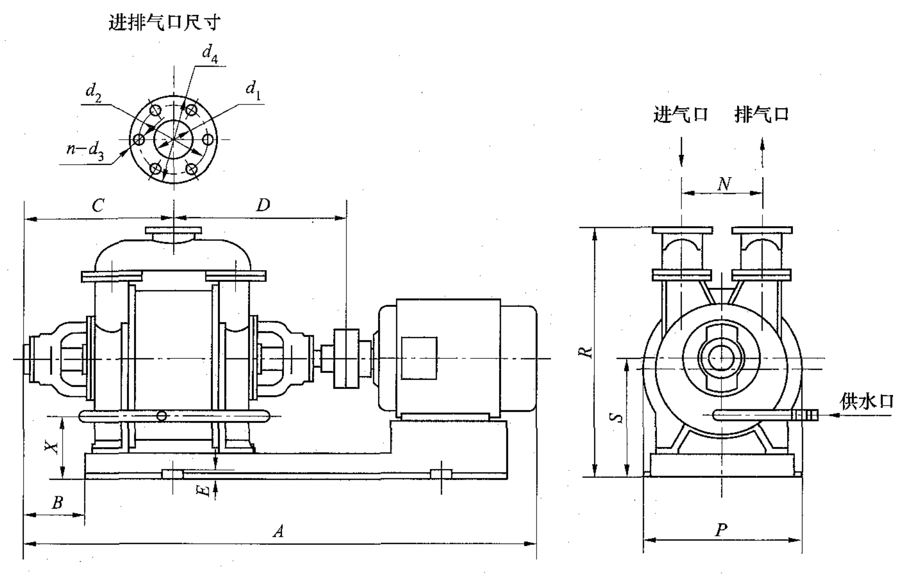



图 5-14　水环式真空泵安装尺寸图

**表 5-30**　　　**水环式真空泵安装尺寸**　　　（mm）

| 型号 | A | C | D | F | G | H | J | K | N | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SK-12 | 1761 | 448 | 538 | 270 | 940 | 1420 | 530 | 480 | 290 | 440 |
| SK-27 | 2500 | 556 | 674 | 350 | 1270 | 1910 | 650 | 600 | 350 | 680 |
| SK-42 | 2720 | 630 | 750 | 400 | 1445 | 2120 | 650 | 600 | 350 | 680 |
| 型号 | R | S | X | Z | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $d_4$ | $d_5$ | n |
| SK-12 | 780 | 525 | 203 | G1/2″ | 80 | 150 | 14 | 180 | 18 | 4 |
| SK-27 | 1050 | 525 | 260 | G3/4″ | 150 | 200 | 18 | 235 | 27 | 6 |
| SK-42 | 1050 | 525 | 260 | G3/4″ | 150 | 200 | 18 | 235 | 27 | 6 |

**表 5-31**　　　**常用负压风机参数**

| 转速（r/min） | 流量（$m^3$/min） | 升压（kPa） | 轴功率（kW） | 电动机功率（kW） | 参考尺寸（长×宽×高，mm） | 转速（r/min） | 流量（$m^3$/min） | 升压（kPa） | 轴功率（kW） | 电动机功率（kW） | 参考尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 970 | 30.7 | –49 | 40.7 | 45 | 2640×1080×1230 | 730 | 70.5 | –49 | 87.5 | 110 | 2394×1200×1060 |
| 970 | 29.3 | –54 | 44.3 | 55 | | 730 | 67.7 | –54 | 95.8 | 110 | |
| 970 | 27.5 | –59 | 47.9 | 55 | | 730 | 64.2 | –59 | 104 | 132 | |
| 970 | 25.4 | –64 | 51.6 | 75 | | 730 | 59.8 | –64 | 112 | 132 | |
| 970 | 22.5 | –69 | 55.2 | 75 | | 730 | 54.1 | –69 | 121 | 132 | |
| 970 | 18.7 | –74 | 58.8 | 75 | | 730 | 46.5 | –74 | 129 | 160 | |
| 970 | 13.2 | –78 | 62.4 | 75 | | 730 | 35.5 | –78 | 137 | 160 | |
| 1450 | 52.7 | –49 | 60.9 | 75 | | 980 | 105 | –49 | 117 | 132 | — |
| 1450 | 51.3 | –54 | 66.3 | 75 | | 980 | 102 | –54 | 128 | 160 | |
| 1450 | 49.5 | –59 | 71.7 | 90 | | 980 | 98.9 | –59 | 139 | 160 | |
| 1450 | 47.4 | –64 | 77.1 | 90 | | 980 | 94.7 | –64 | 150 | 160 | |
| 1450 | 44.5 | –69 | 82.5 | 110 | | 980 | 89.2 | –69 | 161 | 185 | |
| 1450 | 40.7 | –74 | 89 | 110 | | 980 | 81.8 | –74 | 172 | 185 | |
| 1450 | 35.2 | –78 | 93.4 | 110 | | 980 | 71.3 | –78 | 183 | 200 | |

续表

| 转速（r/min） | 流量（m³/min） | 升压（kPa） | 轴功率（kW） | 电动机功率（kW） | 参考尺寸（长×宽×高，mm） | 转速（r/min） | 流量（m³/min） | 升压（kPa） | 轴功率（kW） | 电动机功率（kW） | 参考尺寸（长×宽×高，mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 980 | 90 | –49 | 108 | 132 | — | 730 | 114 | –49 | 132 | 160 | — |
| 730 | 86.7 | –54 | 118 | 132 | | 730 | 110 | –54 | 145 | 160 | |
| 730 | 82.6 | –59 | 129 | 160 | | 730 | 106 | –59 | 157 | 185 | |
| 730 | 77.4 | –64 | 139 | 160 | | 730 | 100 | –64 | 170 | 185 | |
| 730 | 70.7 | –69 | 149 | 160 | | 730 | 9203 | –69 | 182 | 200 | |
| 730 | 61.6 | –74 | 159 | 185 | | 730 | 82.1 | –74 | 195 | 220 | |
| 730 | 48.6 | –78 | 170 | 185 | | 730 | 67.6 | –78 | 207 | 220 | |

## 四、布置设计

1. 总体布置要求

回转式风机和抽真空设备应布置在输灰点附近，并宜布置在独立建筑物内。当与其他建筑物毗连或合用时，宜用墙隔开。

2. 内部布置要求

回转式风机房及水环式真空泵房的布置应满足下列要求：

（1）设备宜采用单列布置。

（2）设备间的主要通道宽度不宜小于 1.5m，设备与内墙之间的通道宽度不宜小于 1.2m。

## 五、计算举例

国外某 1×330MW 燃煤电厂负压气力除灰系统中气源系统的设计。

1. 落实工程要求

（1）工程所在地气候条件。

平均环境温度：20℃

最高环境温度：38℃

最低环境温度：15℃

大气压力：0.1MPa（a）

（2）工程气源系统针对负压气力除灰系统用气。

（3）工程气源系统用户气量和空气品质要求。负压气力除灰系统用气量为 145m³/min，空气压力为–45kPa。

2. 确定系统主要参数

负压气源系统总出力为

$$q_f=1.1\times145=159.5\ (\text{m}^3/\text{min})$$

负压气源系统压力为

$$p_f=-1.2\times45=-54\ (\text{kPa})$$

3. 确定气源系统配置

系统设置 3 台 82m³/min、压力为–59kPa 的负压风机，2 台运行，1 台备用。每台负压风机配备一台冷却器。

系统流程为：负压风机吸气口通过管道与负压输送系统的组合式收尘器连接，对负压输送系统中经过过滤的空气进行抽吸，使输送系统形成所需负压。抽吸的空气通过出口消声器排入大气，如图 5-15 所示。

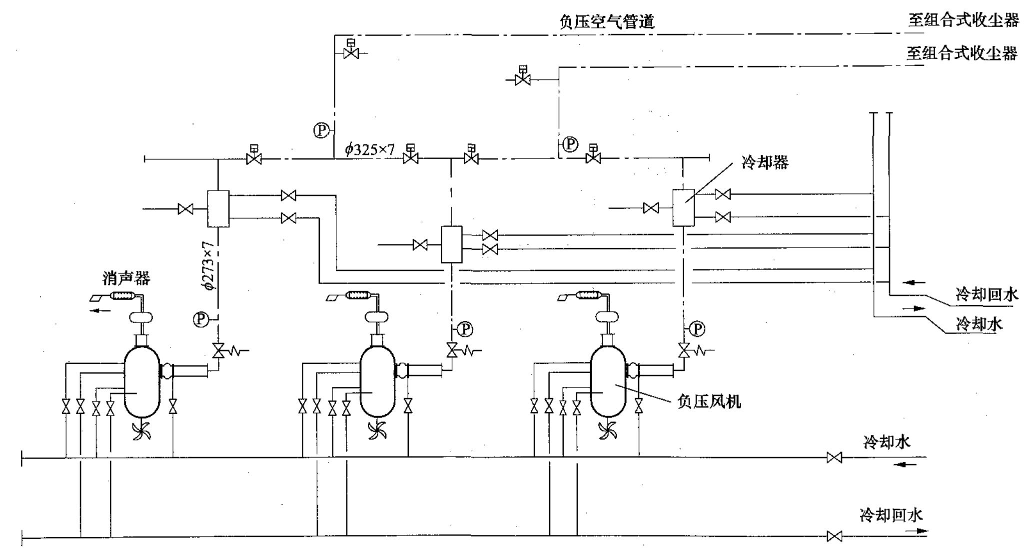



图 5-15 系统流程图

4. 配合资料

根据气源系统辅助系统设计要求，向相关专业提出配合资料，见表5-32。

5. 完成负压风机房布置图

（1）负压风机房的平面布置图，如图5-16所示。

**表5-32　　负压风机房配合资料**

| 接受专业 | 提　资　内　容 | 备注 |
|---|---|---|
| 给水排水 | （1）负压风机及冷却器的冷却水量和压力、水质要求。<br>（2）负压风机房冷却进出水母管接口要求 | 冷却水量可通过设备选型查找，最终由设备厂家提出 |
| 土建 | （1）负压风机房位置要求、尺寸要求。<br>（2）负压风机房开门要求、起吊设备要求。<br>（3）负压风机房设备基础资料 | 设备尺寸可通过设备选型查找，最终由设备厂家提出 |
| 仪表 | （1）设备联锁要求。<br>（2）负压风机房布置资料 | |

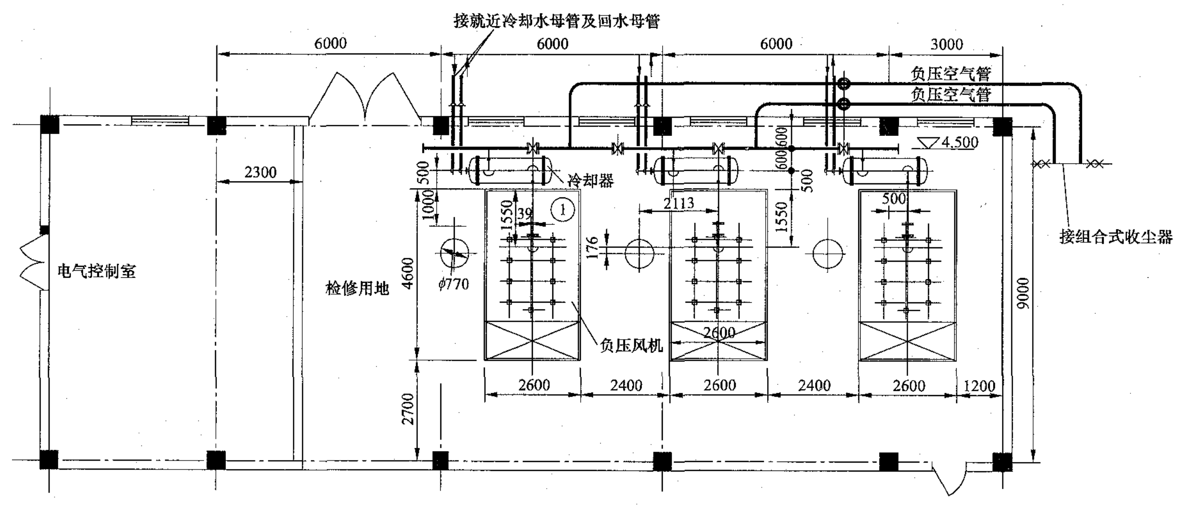



图5-16　负压风机房的平面布置图

（2）负压风机房的断面布置图，如图5-17所示。

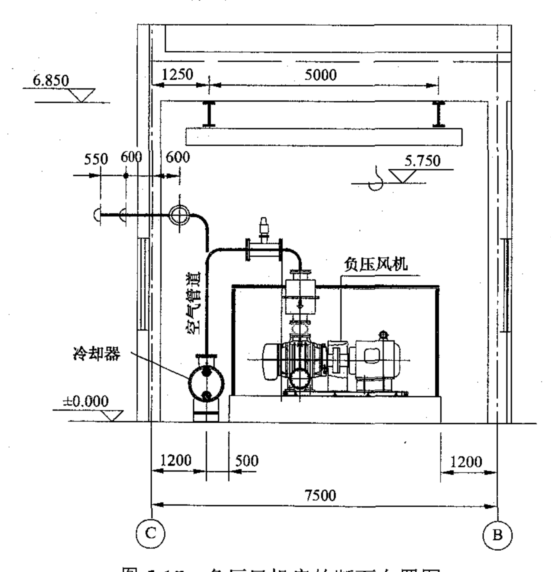



图5-17　负压风机房的断面布置图

# 第六章

# 物料存储及卸料系统

物料存储及卸料系统具有收集、存储和卸料的功能，可中转缓存物料、平衡工艺物流及事故紧急存放等，有的存储设备还兼顾含水物料的脱水等工作。

物料存储及卸料系统的范围是从存储设备（设施）物料入口开始，到卸料装置出口为止的所有部分，主要由物料存储系统和卸料系统两大部分组成。

火力发电厂除灰专业的物料种类较多，应根据系统需求、上下游系统情况、物料量、物料特性、建设周期、环境等因素，有针对性地进行存储系统的设计。目前，除灰专业的物料特性数据测试及料仓设计研究方面的工作做得还不够。有条件时，应系统性地收集整理除灰专业涉及的各种物料，进行大量物料特性数据测试工作和料仓设计研究方面的工作，以期做到设计上的安全、合理、经济。

## 第一节　基　本　概　念

### 一、料仓内物料的状态

（一）料仓内物料的流态

物料储存在料仓内，在卸料时会呈现不同的流态，一般分为漏斗流、扩散流、整体流三种，如图 6-1 所示。

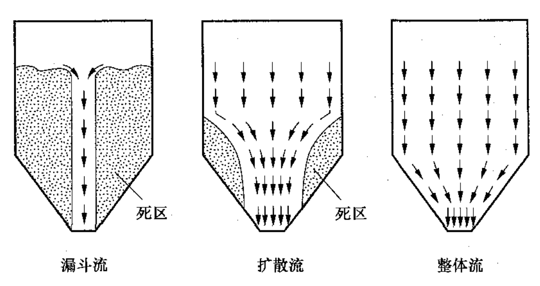



图 6-1　料仓内物料的流态

1. 漏斗流

如图 6-1 所示，卸料口上方形成一个管斗（又称鼠洞），物料主要沿中心区域的管斗流动，周围有大量的死区。

漏斗流料仓中物料的主要流动顺序是先进后出；死区的物料流动性会随时间的延长而变得越来越差，直至不流动，要到停产时人工清仓，这降低了料仓的空间利用率，严重时，料仓板结，无法继续使用；漏斗流料仓中物料流动不均衡，塌落的物料产生的冲击力可能会压实料仓出料口，形成结拱。

2. 扩散流

扩散流是介于漏斗流和整体流之间的流动形态，如图 6-1 所示。

扩散流料仓兼具漏斗流料仓的经济性和整体流料仓的特点，可有针对性地用于部分物料的存储。

3. 整体流

如图 6-1 所示，料仓中各部位的物料，同时呈整体的流动形态。

整体流的料仓物料流动顺序是先进先出，料仓没有死区，流动性好，可有效避免物料在料仓里出现死区。

（二）物料的结拱

结拱又称架桥，俗称蓬灰，是物料堵塞排料口以致不能进行排料现象的总称。料仓结拱的类型一般有四种，如图 6-2 所示。

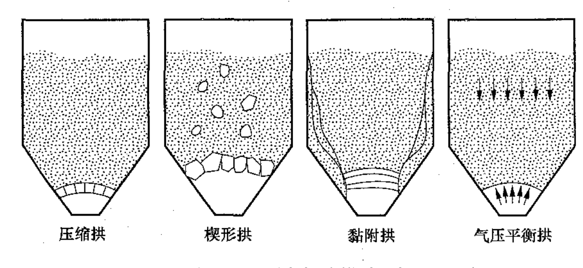



图 6-2　料仓结拱类型

结拱与堆积密度、压缩性、黏附性、可湿性、喷流性、拱顶物料质量、储存时间、储仓卸料口尺寸等因素有关。

### 二、影响物料流动的因素

影响料仓流动的因素分为外因和内因。

外因主要是自然环境、气候（气温、风、雨雪等）、地质、地震等。当温度低于大气露点时，物料表面开始结露，从而变得潮湿，流动性变差；地震、风雪等都对料仓的强度和刚度产生直接影响；严寒地区和盐雾腐蚀地区还需考虑钢材的适应性。

内因主要有物料特性（如透气性、吸附性等）、料仓结构形式（如外摩擦角、仓壁材料刚度、料斗形状和卸料口尺寸等）及助流系统（破拱、气化等）设计等。

## 三、物料存储及卸料系统设计原则

1. 物料存储

（1）料仓流态选择。结合除灰专业物料特性和工程设计要求，选择合适的料仓流态，料仓设计时应避免结拱现象，避免形成漏斗流。

1）对于块状和粗颗粒等尺寸较大、密度较大的物料，如干渣、石子煤、床料等，一般磨蚀性强，透气性好（存气性差），容易形成机械性结拱现象，料仓设计宜采用锥底扩散流料仓，并配以破拱措施。

2）对于细颗粒和粉状物料，一般需要做一定的试验判断（存气性试验），如粉煤灰、石灰石粉等物料，存气性好，气化特性较好，充气后容易变性而使得流动性变好，料仓设计时宜采用辅助气化系统而设计为整体流料仓。

3）对于吸潮性较强、吸潮后容易板结变性的物料，在料仓设计时，需考虑密封、除潮措施，必要时需采用热风气化系统。

（2）破拱措施。针对不同的结拱类型，采取以下有针对性的破拱措施：

1）合理设计料仓的形状和尺寸。

2）针对部分结拱类型，可对料仓进行保温隔热。

3）一般物料可减小粉料对料仓壁的流动摩擦阻力。

4）降低料仓内粉料的压力，采取振打、空气炮、气化等助流措施。

2. 物料卸料

物料卸料系统设计，主要是根据系统需求、物料转运要求，对卸料设备进行合理选型和布置设计。

# 第二节　物料存储系统

物料存储系统承担着物料收集、存储工作。存储系统的主要设备是储料仓（也叫储料库，简称料仓）。系统范围从料仓进料口开始至排料口为止，由上至下一般分为四个建筑层：顶层、贮料层、设备运转层、零米层。

电厂除灰工艺的料仓，有以下几种分类方式：

（1）按照存储介质可分为渣仓、灰库、石灰石（粉）仓、床料仓、石子煤仓等。

（2）按照结构形状可分为平底库（仓）、锥底库（仓）等。

（3）按照建造材料可分为钢筋混凝土库（仓）、钢制库（仓）、利浦（Lipp）筒库（仓）等。

## 一、系统设计要求

### （一）数量和容积

除灰料仓的数量与容积，需要结合整个系统设计需求、上游系统、卸料转运方式、综合利用、总平面规划、地质条件、交通运输等确定，表 6-1 列出了除灰料仓的数量与容积的常规要求。

表 6-1　　除灰料仓数量与容积

| 名称 | 功能或上下游方案 | 总容积对应的存储时间（h）① | 数量（座） | 备　注 |
|---|---|---|---|---|
| 渣仓 | 存储仓 | 14～24 | 1～2 座/炉 | |
| | 中转仓 | ≥8 | 1 座/炉 | |
| 灰库 | 存储库 | ≥24 | 2～4 座/两炉 | |
| | 中转库 | ≥8 | 按需 | |
| | 半干法烟气脱硫灰库 | ≤24 | 1 座/炉 | 单独设置 |
| 石灰石粉仓 | 存储仓 | ≥24 | 1 座/炉② | |
| | 中转仓 | 2～4 | 按需确定 | |
| | 制备系统缓冲仓 | 8～10 | 按需确定 | |
| | 制备系统成品仓 | 6～8 | 按需确定 | |
| 床料仓 | 无需在线添加时 | 8 | 1 座/炉③ | 人工添加方案可不设床料仓 |
| | 机械在线添加时 | 8 | 1 座/炉 | |
| | 气力在线添加时 | 24 | 1 座/炉 | |
| 石子煤仓 | 机械方案时 | ≥24 | 1 座/炉 | |
| | 气力方案时 | ≥24 | 1 座/两炉 | |

注　本表列出的料仓数量与容积是一般要求，设计过程中，还应根据实际工程条件确定。

① 指在锅炉最大连续蒸发量工况下，燃用设计煤种时的排（耗）量的相应存储时间。例如存储灰库，总容积不应小于锅炉最大连续蒸发量工况下，燃用设计煤种时 24h 的排灰量。

② 罐车进厂的，料仓数量还需要考虑石灰石耗量、罐车输送能力和输送高度（建议料仓不高于 20m）、作业场地条件等。

③ 床料仓数量为建议值，可根据实际灵活掌握，如将底渣仓兼作床料仓，但注意需有床料专用接口。

（二）布置位置

料仓的位置由其在系统中所起的作用、进排料方式、场地条件、运行管理等因素决定。

1. 渣仓

渣仓布置需满足以下要求：

（1）当厂外采用汽车运输时，渣仓宜布置在锅炉房侧，渣仓下汽车通道宜采用贯通式。

（2）当厂外采用火车运输时，存储渣仓宜布置在铁道边或架设在铁道上，中转渣仓宜靠近锅炉房布置。

（3）当厂外采用船舶运输时，存储渣仓宜布置在码头区域，中转渣仓宜靠近锅炉房布置。

（4）当灰渣综合利用用户区紧邻电厂时，也可将渣仓直接布置在综合利用用户区。

2. 灰库

灰库布置需满足以下要求：

（1）中转灰库宜靠近锅炉除尘器布置。

（2）存储灰库一般根据转运方案确定，布置需满足以下要求：

1）当厂外采用汽车运输时，存储灰库宜布置在炉后区域，如烟囱后方、脱硫场地附近区域等，灰库下汽车通道宜采用贯通式；

2）当厂外采用火车运输时，存储灰库宜布置在铁道边或者直接架设在铁道上；

3）当厂外采用船舶运输时，存储灰库宜布置在码头区域；

4）当综合利用用户紧邻电厂时，也可将存储灰库直接布置在综合利用用户区。

3. 石灰石粉仓

石灰石粉仓布置需满足以下要求：

（1）当石灰石粉采用厂内制备时，石灰石缓冲仓和成品仓宜布置在制备车间内。

（2）当石灰石粉采用外购成品粉时，石灰石粉仓应靠近锅炉房布置，场地规划需考虑汽车输粉作业和运输需求。

（3）当石灰石粉采用两级输送时，二级粉仓宜靠近锅炉接口布置。粉仓下卸料输送设备出口高度，宜与锅炉石灰石粉接口高度一致。

4. 床料仓

床料仓布置需满足以下要求：

（1）当底渣作为床料添加时，宜利用布置在炉侧的底渣仓作为床料仓。

（2）当床料由汽车运输进厂，后续输送采用气力输送系统时，床料仓宜布置在锅炉侧，0m 场地应考虑运输汽车作业空间。

（3）当床料由汽车运输进厂，后续输送利用输煤系统时，床料仓宜布置在煤仓间。

5. 石子煤仓

石子煤仓宜布置在锅炉煤仓间 0m 附近，仓下设汽车运输通道。

（三）料仓形状

一般来说，圆形结构的料仓，无论其装卸料时物料在料仓内的充满度、卸料的均匀性，还是料仓结构受力情况，均优于其他形状的料仓。因此，圆形料仓是料仓设计的首选。

当受条件限制，需采用方形等料仓时，在料仓设计过程中，更要充分考虑物料的特性及在料仓内的流动特性等。

（四）建造材料

料仓的建造材料应用最为广泛的是钢筋混凝土和钢，在具体工程设计中，如何选择，需要综合物料储存量、外部条件、综合造价、物料特性等，经技术经济比较后确定。表 6-2 列出了两种材料建造的料仓的优缺点。

**表 6-2 钢筋混凝土和钢结构料仓的比较**

| 序号 | 项目 | | 钢筋混凝土 | 钢结构 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 技术性 | 质量 | 大 | 小 |
| | | 密封性能 | 一般 | 好 |
| | | 保温性能 | 好 | 差 |
| | | 抗腐蚀能力 | 好 | 差 |
| | | 吸湿性 | 有 | 较大 |
| | | 耐温性 | 差 | 好 |
| | | 寿命 | 长 | 短 |
| | | 抗震性 | 一般 | 好 |
| | | 材料低温特性 | 好 | 一般 |
| 2 | 经济性 | 工程量 | 大 | 小 |
| | | 造价① | 较低 | 较高 |
| 3 | 施工 | 施工难易程度 | 较难 | 较易 |
| | | 施工周期 | 长 | 短 |
| | | 改建难易程度 | 难 | 易 |
| 4 | 检修维护 | 检修维护工作量 | 小 | 大 |

注 根据火力发电厂料仓的设计运行经验，一般在 1000$m^3$ 以下的料仓，多采用钢结构料仓；2000$m^3$ 以上的粉煤灰料仓多采用钢筋混凝土结构的平底仓（灰库）。

① 应根据具体情况比较后确定。

1. 渣仓

干式排渣系统的渣仓，渣温较高，有的甚至存在内燃风险等，一般采用耐温更好的钢结构。此外，考虑渣的颗粒较大、流动性较差，料仓底部一般采用锥

底形式。

湿式排渣系统的渣仓，由于严密性、脱水装置安装要求，容积一般也不大，通常也采用钢结构。

2. 灰库

由表 6-2 可知，一般电厂灰库库容大，故以钢筋混凝土灰库为主。

3. 其他料仓

由于石灰石粉仓、石子煤仓、床料仓等容积一般较小（一般小于 1000m³），以钢结构为主。

4. 利浦（Lipp）筒结构料仓

利浦（Lipp）筒结构料仓采用螺旋卷边钢板制作而成，仓壁钢板较薄（一般为 3mm 左右），采用折边咬合成型，所以整体造价低于普通钢结构料仓，甚至可能低于钢筋混凝土料仓。除灰专业设计中，也可以根据综合比较后，采用利浦筒结构的料仓。但需注意，由于利浦筒结构料仓仓壁较薄，抗腐蚀能力和抗蠕变能力较差，高寒地区、沿海和有腐蚀性地区、地质和地震条件差的地区慎用。设计时，还要结合利浦筒结构料仓的特点，如利浦筒不能承受径向力，就应避免进料、卸料的不均匀性；较大荷载管道不能直接生根在侧壁，仓顶不能直接安装较大荷载或振动的设备管道等。

5. 大容量钢板仓

有些地区综合利用情况非常好，许多电厂不再设置长期灰渣堆料场，为了满足粉煤灰销售淡季、节假日、极端天气等情况下灰渣堆存需要，可采用容量较大（一般大于 1 万 t，有的甚至达十几万 t）的大型落地钢板仓。随着灰渣综合利用的推广，大容量钢板仓的应用将会越来越多。

## 二、锥底料仓设计

### （一）总体说明

锥底料仓中，有存储干状物料的干料仓，也有具有脱水功能的湿渣仓，这里分别进行说明。

1. 干料仓

干料仓由上而下一般分为四层（见图 6-3）：顶层、贮料层、运转层和零米层。

顶层一般布置有进料管道、排气过滤器（布袋除尘器等）、检修起吊设施、压力真空释放阀、人孔门、料位计及相关配电箱等电气设备。

贮料层一般布置有料位开关、侧壁检修人孔，内壁还布置有顶层到贮料层底的爬梯。锥体部分外壁一般装有助流或破拱设施（气化箱、空气炮或振打器等）。锥斗部分根据工艺要求，设有一个或多个卸料口，与下部输送或卸料设施连接。

运转层是安装输送或卸料设备的平台，还可布置气化风设备及管道等。

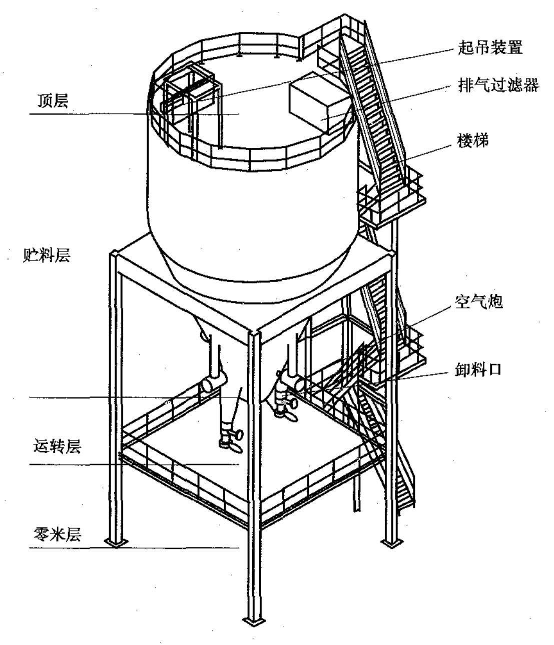


图 6-3　干料仓

零米层是物料外运的通道。通常的汽车或火车转运，零米层作为运输的通道。如果作为中转仓，零米层通常布置中转设备，如仓泵、连续输送器、制浆设备、灰渣池、灰渣泵等。根据需要，零米层也可设排污沟和排污泵，收集区域内的污水转送出去。

料仓的侧面需设置从零米层到控制室、运转层、顶层的楼梯。还需在侧壁人孔门、料位计等需检修操作的部位设有人员可到达的维护平台。气力输送系统的料仓还在侧壁布置有输送管道，如灰管。

当多台料仓布置在一起时，支架部分应采用连体结构，运转层和顶层应连通。

从制造材料上来说，常见的锥底料仓是全钢结构，也有少数是钢筋混凝土筒体+钢锥底的，全钢筋混凝土结构的锥底料仓应用不多。

2. 湿渣仓

如图 6-4 所示，湿渣仓与干料仓外形上大同小异，仅仅是各层布置有所区别。

湿渣仓顶层布置有捞渣机或者其他机械输送设备，一般布置有料位计和人孔门，如并排布置两台渣仓，则有电动三通或电动三通+机械输送设备（带式输送机）等分仓机械，顶部同样设有检修起吊设施。

湿渣仓贮料层的锥体部分一般有析水及反冲洗水装置、振打装置、排渣门总成和渣斗。

湿渣仓运转层用作锥体部分各设施的检修维护平台，设在排渣门总成下方，方便检修。

湿渣仓的零米层是运输通道层，侧面有可观察摆动渣斗和装车作业的控制室。

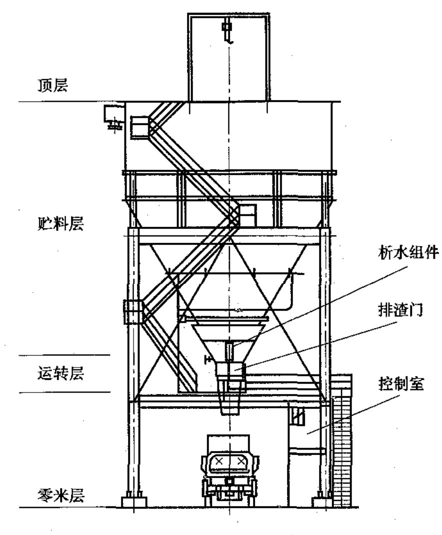



图 6-4　湿渣仓

## （二）设计计算

1. 容积计算

（1）中心进料料仓容积计算。中心进料的锥体料仓的尺寸可简化为图 6-5。

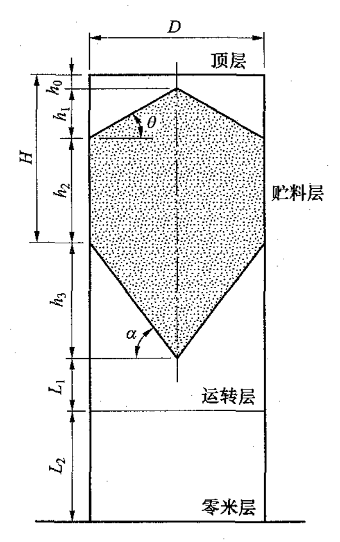



图 6-5　锥底料仓中心进料简化图

物料在锥体料仓里堆积，由于受压实度、物料自然堆积角度、仓顶高料开关报警位置等因素影响，不可能充满整个料仓每个角落。为方便计算，料仓按图 6-5 简化。根据图 6-5，有效的储存容积由自然堆积的圆锥体料堆、圆柱体部分和下部倒锥体部分组成，有效容积可按式（6-1）进行计算

$$V_a=\frac{\pi D^2 h_1}{12}+\frac{\pi D^2 h_2}{4}+\frac{\pi D^2 h_3}{12}=\frac{\pi D^3}{24}\tan\theta+\frac{\pi D^2 h_2}{4}+\frac{\pi D^3}{24}\tan\alpha=\frac{\pi D^2}{24}[(\tan\theta+\tan\alpha)D+6h_2] \tag{6-1}$$

式中　$V_a$——料仓有效容积，$m^3$；

$D$——料仓内壁直径，m；

$\theta$——物料安息角，(°)，根据试验测得，部分物料可查阅附录 B；

$h_1$——物料自然堆积成的料堆高度，m；

$h_2$——物料圆柱部分高度，m；

$h_3$——锥体部分高度，m；

$\alpha$——锥体母线与水平面夹角，(°)，按式（6-3）计算。

（2）偏心进料料仓容积计算。工程实际中，经常会遇到物料不是从料仓中心进入的情况，如图6-6所示。

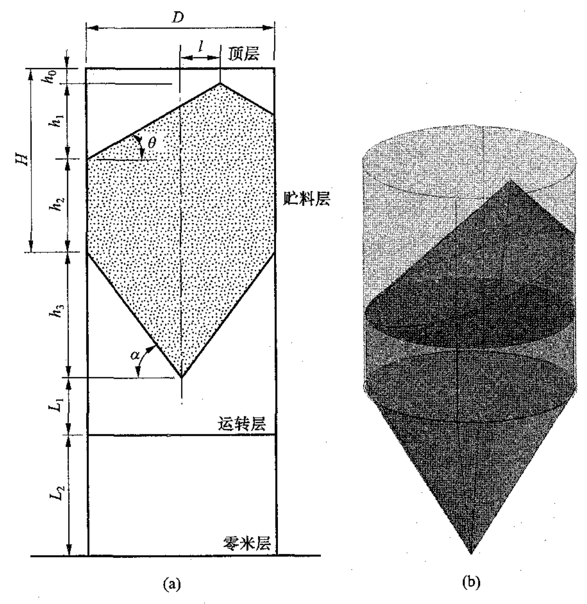



图 6-6　锥底料仓偏心进料简化图
（a）平面图；（b）三维示意

偏心进料的料仓有效容积按式（6-2）计算

$$V_a=K\frac{\pi D^3}{24}\tan\theta+\frac{\pi D^2 h_2}{4}+\frac{\pi D^3}{24}\tan\alpha \tag{6-2}$$

式中　$K$——系数，与物料锥顶及料仓中心距离 $l$ 和料仓直径 $D$ 的比值有关，可查图 6-7 得到。

如设计整体流料仓，$\alpha$ 角可按式（6-3）计算

$$\alpha=90°-\gamma \tag{6-3}$$

式中　$\gamma$——最大半顶角，(°)，由式（6-4）计算得出。

锥顶角的一半，称为半顶角 $\gamma$。半顶角越小，料仓内物料的流动性越好，但也会加高料仓，经济性变差。为确保流态为整体流，所需的最大半顶角可按式（6-4）计算

$$\gamma=\frac{180-\varphi_0}{2}-\frac{\arccos\left(\dfrac{1-\sin\varphi_i}{2\sin\varphi_i}\right)-\arcsin\left(\dfrac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi_i}\right)}{2}-3 \tag{6-4}$$

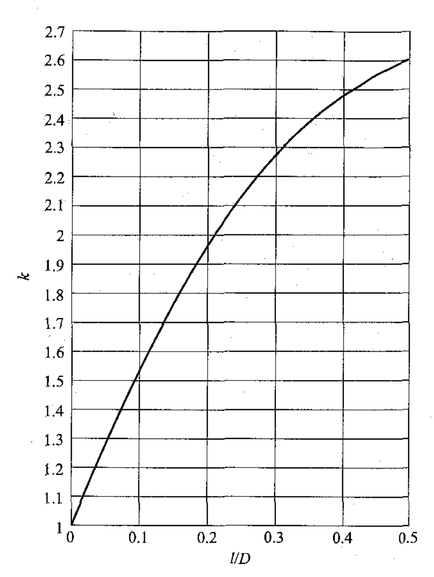


图 6-7　偏心进料 $k$ 值选取图

式中　$\varphi_0$ ——物料外摩擦角，(°)，根据试验测得，部分物料可查阅附录 B；

$\varphi_i$ ——物料内摩擦角，(°)，根据试验测得，部分物料可查阅附录 B。

式（6-4）中的 3°为设计裕度，以避免物料出现漏斗流。

料仓总容积可按式（6-5）进行计算

$$V=\frac{\pi D^2 H}{4}+\frac{\pi D^2 h_3}{12}=\frac{\pi D^2 H}{4}+\frac{\pi D^3}{24}\tan\alpha =\frac{\pi D^2}{24}(6H+D\tan\alpha) \tag{6-5}$$

式中　$V$——料仓储存容积，$m^3$；

$H$——料仓直筒部分总高度，m。

在设计工作中，通常是已知物料流量和存储时间，求解单台料仓所需的储存容积，这时，可按式（6-6）计算

$$V=\frac{tG}{n\beta\rho} \tag{6-6}$$

式中　$t$——储存时间，h，按表 6-1 选取；

$G$——物料流量，t/h；

$n$ ——料仓台数，台，按表 6-1 选取；

$\beta$——料仓有效充满系数；

$\rho$——物料堆积密度，试验测得，部分物料可查阅附录 B。

式（6-6）中的料仓有效充满系数是指有效容积占总容积的比例，根据物料特性、进料偏心情况等确定，对于飞灰库，在粗略计算式中，一般取 0.8～0.9。

2. 外形尺寸计算

工程设计中，往往需要计算料仓的直径、高度等数据，可按以下方法求解。

首先，选取料仓直径 $D$，通常可选取整数，则

$$H=\frac{4V}{\pi D^2}-\frac{D\tan\alpha}{6} \tag{6-7}$$

或通过有效容积计算 $H$

$$H=\frac{4V_a}{\pi D^2}+\frac{(2\tan\theta-\tan\alpha)D}{6}+h_0 \tag{6-8}$$

式中　$h_0$ ——料堆顶部与料仓顶的距离，m。

料仓堆满料时，料堆顶部与仓顶之间的距离需考虑仓顶板（梁）高度影响，并适当考虑余量，一般按 1.5～2m 考虑。

卸料口距离运转层平台的高度取决于后续输送设备安装高度，且需要考虑运转层人员检修通行的净空要求。零米层净空取决于后续转运设备高度。最终得出料仓总高度

$$H_s=H+\frac{D}{2}\tan\alpha+L_1+L_2 \tag{6-9}$$

式中　$H_s$ ——料仓总高度，m；

$L_1$ ——料仓排料口至运转层高度，m；

$L_2$ ——运转层至零米层高度，m。

3. 料仓直径与高度的关系

料仓在满足同等容积的条件下，可选择不同的直径和高度。在设计料仓时，直径或高度的变化都将会影响建造料仓的费用。因此，可按照最小建造费用原则，合理地选择料仓的直径与高度之比。锥体料仓的高径比 $H/D$ 按式（6-10）计算，得

$$H/D=\frac{1-\sqrt{1-\frac{1}{\cos^2\alpha}}}{2} \tag{6-10}$$

锥体母线与水平面夹角 $\alpha$ 由式（6-3）计算确定，如 $\alpha$ 值是 60°，则式（6-10）可简化为

$$H/D=0.62 \tag{6-11}$$

带筒体的锥底料仓，其高径比 $H/D$ 按式（6-12）计算，得

$$H/D=\frac{1-\sqrt{1-\frac{1}{\cos^2\alpha}}-\frac{1}{\cos\alpha}}{2} \tag{6-12}$$

同样，当 $\alpha$=60°时，则简化为

$$H/D=2.62 \tag{6-13}$$

必须指出：以上计算结果仅是从料仓的基建投资费用最经济的观点得出的，仅作参考。实际上，还要考虑工程设计中的物料料性、具体布置条件、地质情况及系统运行的经济性等有关因素。

4. 荷载计算

料仓贮料层的荷载按下式计算

$$F=\rho V \tag{6-14}$$

式中　$\rho$ ——物料的堆积密度，$t/m^3$，部分物料可查

阅附录B。

在火力发电厂除灰设计中，计算容积和计算荷载时，应采用不同的堆积密度，且应尽量通过物料特性试验取得。通常，容积计算的堆积密度取值要小些，荷载计算时堆积密度取值要大些。除灰专业结合部分物料测试和工程经验，总结出了部分数据，在无试验数据时，部分物料堆积密度可按以下原则选取：

（1）在渣仓的设计中，计算仓体容积时，渣的堆积密度宜为0.9～1.0t/m³，计算仓体结构荷载时，堆积密度宜为1.3～1.4t/m³。

（2）在灰库设计中，计算库容时，灰的堆积密度宜为0.7～0.9t/m³，计算灰库结构荷载时，灰的堆积密度宜为1.0～1.2t/m³。

（三）布置设计要求和选型

1. 布置设计要求

（1）顶层。

1）顶层布置的设备、管道、控制箱等要求布局合理、布置美观、方便运行通行及检修方便等。

2）仓顶需考虑雨水因素，各设备管道接口处焊接严密，防止雨水进入，需设有散水坡，必要时可设局部或整体防雨棚。

3）北方地区可根据需要进行封闭，必要时还需采暖，如湿渣仓。

4）周围须设防护栏杆等防止人员跌落的措施，并满足要求：所有升降口、大小孔洞、楼梯和平台，必须装设不低于1050mm高的栏杆和不低于100mm高的脚部护板。离地高度高于20m的平台、通道及作业场所的防护栏杆不应低于1200mm。

5）如果物料主要由重力落入下部料仓，进料口尽量位于料仓中心区域；如果物料由气力输送系统进入料仓，进料口的布置位置还应考虑料仓内气流对物料堆积的影响。

典型的料仓顶层布置见图6-8。

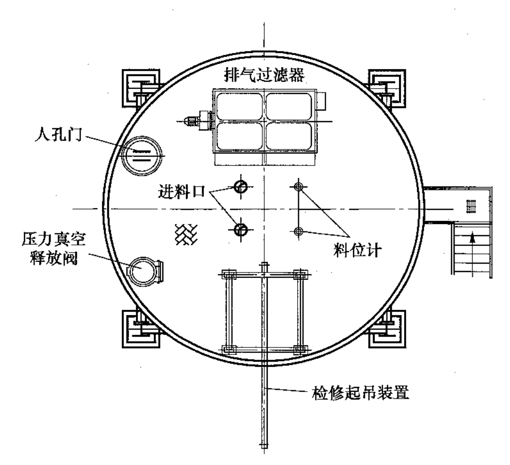



图6-8 典型的料仓顶层布置图

（2）贮料层。

1）贮料层布置的设备、管道、楼梯等要求布局合理、布置美观、方便运行通行及检修方便。

2）锥体部分材料需考虑耐磨，常用耐磨手段有加厚钢板，内衬耐磨材质及涂刷耐磨涂层等。工程应用中，应综合物料特性、耐磨要求和经济性因素等确定。

3）侧壁料位计和人孔门应设检修平台和爬梯。

4）除湿渣仓外，一般锥底料仓下部宜设2个或2个以上卸料口，卸料口设计一般要求布置对称，保证落料顺畅、均匀。

5）锥体部分宜均匀设置助流或破拱设施，当同时采用多种助流设施时，宜错层布置。

典型的料仓贮料层布置见图6-9。

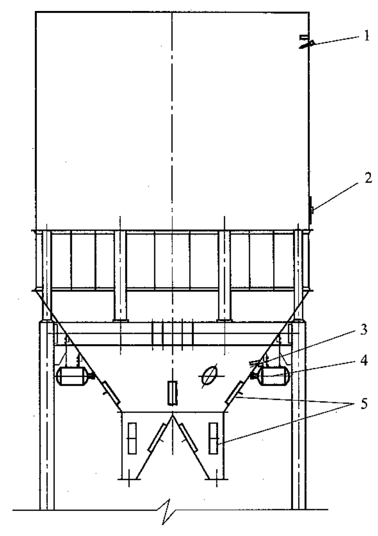



图6-9 典型的料仓贮料层布置图
1—高料位计；2—人孔门；3—低料位计；
4—空气炮；5—气化箱

（3）运转层。

1）运转层设备管道布置整齐，通行方便，易于操作维修。

2）北方地区可根据需要将运转层及零米层封闭，严寒地区还需设采暖设施。

典型的料仓运转层布置见图6-10。

（4）零米层。中转仓的零米层布置相应的中转设备，如仓泵、连续输送器、制浆设备、灰渣池、灰渣泵等。这些设备的布置应满足安装、运行和检修的要求。此时的运转层兼作设备检修平台。存储料仓的零米层通常是交通工具的通道。空间应能充分满足交通运行的相关要求。

以常见的汽车转运为例，料仓下的汽车通道应满足如下条件：

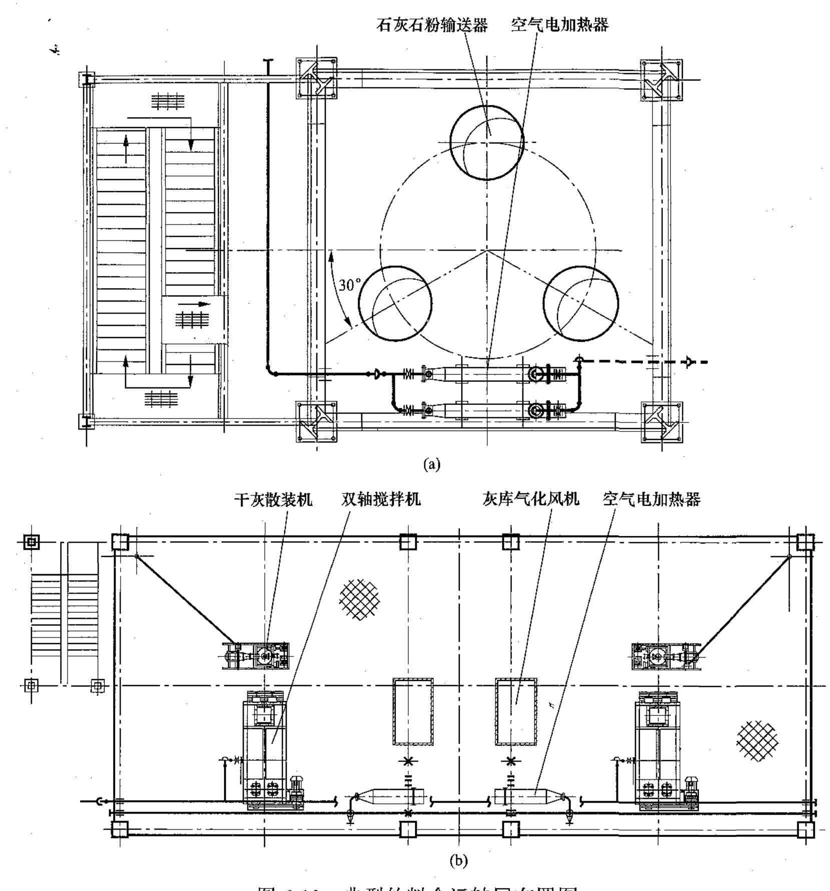



图 6-10 典型的料仓运转层布置图

（a）石灰石粉仓运转层布置；（b）灰库运转层布置

1）车道宽度大于通行车辆的宽度，如图 6-11 所示，一般不小于 4m，车道中心线宜与卸料管中心线重合。

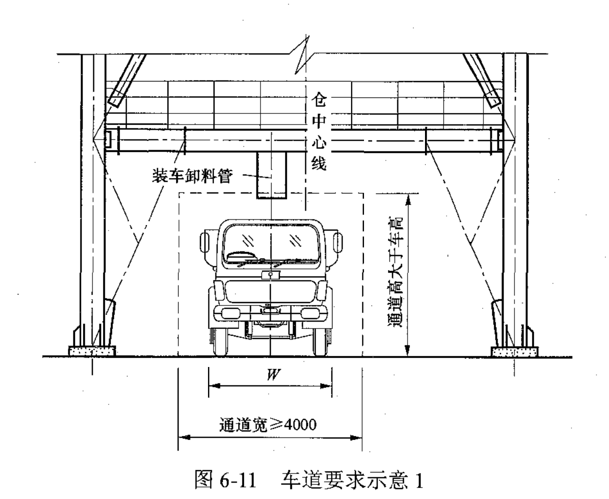



图 6-11 车道要求示意 1

2）固定式卸料口的标高，以及伸缩式卸料口的最高标高一般按汽车最高点高度加 300～500mm 的裕度。

3）采用固定式卸料点，汽车沿车道方向前后移动，使得整个车厢都能落满料。设计时，应充分考虑卸料点前后空间，满足车厢前后作业空间要求。如同一单车道上，需要同时卸料时，相邻卸料点的距离也需考虑装车作业空间要求，如图 6-12 所示。

4）平面上，车道及外部道路需考虑汽车转弯半径，避免车道与料仓立柱、斜撑或其他附属设施的碰撞。

5）当车道上有固定设备，卸料口的设计应满足在车厢前部卸料时，汽车尾端与设备保持足够的距离，并在极限位置之前设置车挡或其他防护措施，如图 6-13 所示。

6）汽车转运时，卸料装置的控制室宜离地 1.5～3.0m。大小满足控制设备及人员操作要求，控制室应配有通风、防尘装置，如图 6-14 所示。

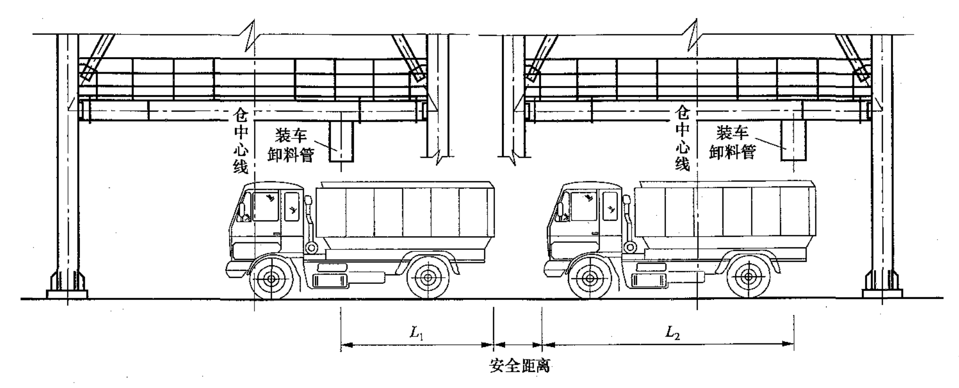



图 6-12　车道要求示意 2

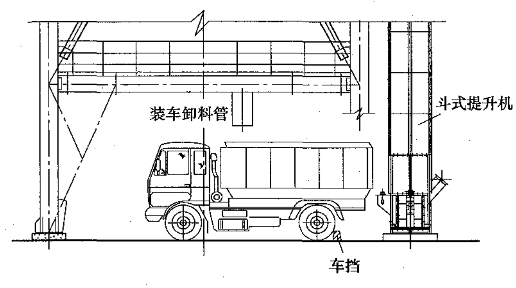



图 6-13　车道要求示意 3

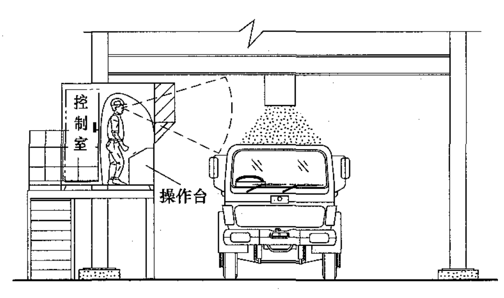



图 6-14　控制室

料仓设计和选型前，应与业主或购买车辆单位明确所使用车辆的型号规格，表 4-26 列出了部分常见自卸车和密封罐车的外形参数，供设计时参考。

2. 常用料仓规格参数

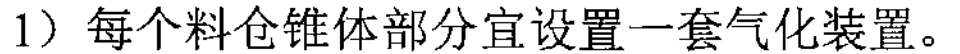
图 6-15 和表 6-3 列出了部分锥体料仓参数，供设计时参考。

（四）锥底料仓气化系统

1. 设计要求

（1）气化装置设计要求。气化装置由气化材料（有气化板、多层帆布、金属网等材料）和金属壳体等组成。气化材料应用较多的是气化板，它是由碳化硅颗粒烧结而成，具有良好的透气性和耐磨性。气化装置安装在料仓的锥体部分，通入加热过后的压缩空气，能够使锥体部分的物料流态化，从而增强流动性，保证卸料顺畅。气化装置通常用于存气性较好的粉状物料，使得充气后的物料流动性大大改善。其设计要求如下：

1）每个料仓锥体部分宜设置一套气化装置。



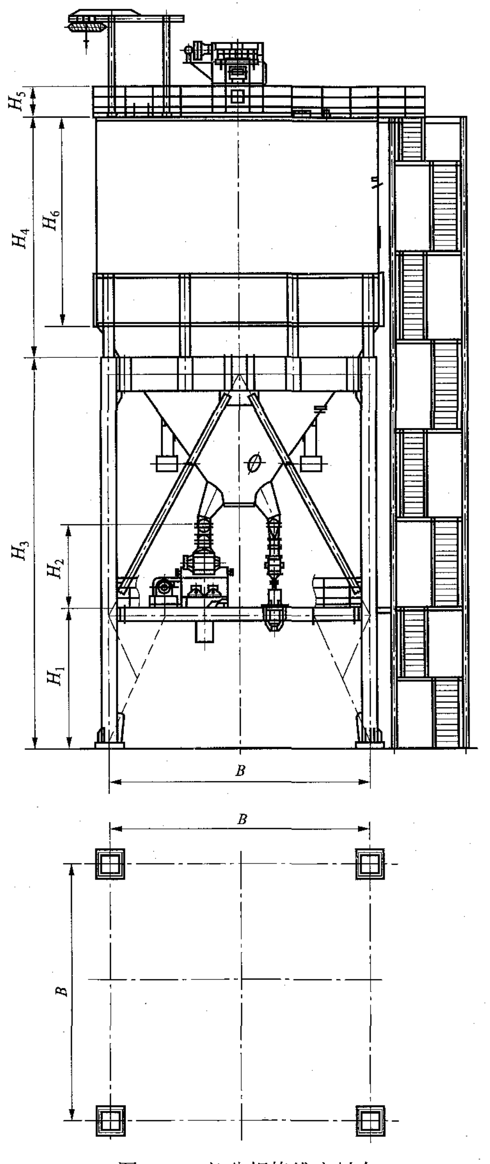



图 6-15　部分规格锥底料仓

**表 6-3　　部分规格锥底料仓参数表**

| 规格 $D$（mm） | | 5000 | 6000 | 8000 | 10000 | 12000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 总容积（$m^3$/仓） | | 98 | 160 | 350 | 650 | 780 |
| 仓壁振打装置 | 仓壁振动器型号 | CZ1000 | CZ1000 | CZ1000 | CZ1000 | CZ1000 |
| | 数量（只/仓） | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| | 电源 | 220V，50Hz | | | | |
| | 功率（kW/只） | 0.22 | | | | |
| 空气炮 | | $V$=100L，气压：0.4～0.8MPa，数量：2～4只/仓 | | | | |
| 气化箱 | | 型号：300×150，流量：0.17$m^3$/min，气压：＞50kPa | | | | |
| 仓顶起吊装置 | | 电动葫芦，起吊重量：1t，数量：1台 | | | | |
| 仓顶料位指示器 | | 根据用户要求可选配雷达射频式、音叉式、重锤式等 | | | | |
| 仓顶配套设备 | | 根据用户进料方式选定 | | | | |
| 仓底卸料设备 | | 根据用户卸料方式选定 | | | | |
| 设备外形（mm） | $H_1$ | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5500 |
| | $H_2$ | 2250 | 2250 | 2820 | 2820 | 2820 |
| | $H_3$ | 10598 | 11463 | 13227 | 15400 | 17485 |
| | $H_4$ | 4400 | 4800 | 5005 | 7100 | 6350 |
| | $H_5$ | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | $H_6$ | 3600 | 4000 | 4205 | 5700 | 5100 |
| | $B$ | 4619 | 5553 | 7400 | 9248 | 11095 |
| 设备总重（t/套） | | 68 | 98 | 130 | 210 | 255 |
| 基础荷载（t/支墩） | | 60 | 95 | 195 | 350 | 425 |

2）气化装置宜根据物料特性选择台数及布置，一般布置两排。第一排的 2 台气化装置对称布置，并应靠近仓底卸料口，第二排的 4 台气化装置在同一圆面均布，如图 6-16 所示。

3）每台气化装置的面积应根据物料特性选择，宜为 150mm×300mm，用气量可取 0.17$m^3$/min（标准状态下）。

4）气化板料侧空气压力可按附录 N 计算（对于粉煤灰，初算可按 50kPa 选取）。

（2）气源系统设计要求。

1）料仓气化风系统根据料仓位置确定，即独立设置的料仓宜单独设一套气化风系统，连体或就近布置的料仓可按一个单元设置一套气化风系统。

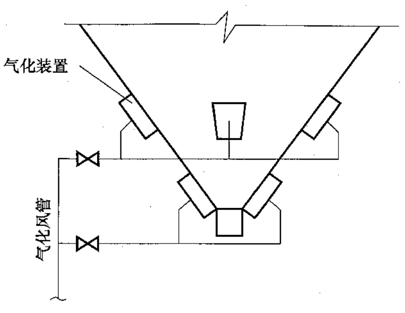



图 6-16　气化装置布置示意图

2）1 个单元宜设 1 台公共备用风机。

3）气化风机总风量宜为系统气化装置气量总和的 110%，见式（6-15）。

4）气化风机压力根据附录 N 计算得出。

5）气化风系统宜设置专用空气电加热器，其加热温度一般大于料仓内物料温度，同时也大于料仓内周围气体露点温度，如电除尘器灰斗加热温度一般取 150℃。

6）空气电加热器及其后管道需保温。

2. 选型计算

（1）气化风机流量

$$Q_F = q_s n \times 110\% \tag{6-15}$$

式中　$Q_F$——气化风机流量，$m^3$/min；

$q_s$——单个气化装置所需耗气量，$m^3$/（min·个），查表 6-4；

$n$——气化装置总数，台。

**表 6-4　　气 化 装 置 参 数**

| 气化板规格（mm×mm） | 150×305 | 175×305 | 200×305 |
|---|---|---|---|
| 工作压力（MPa） | ＜0.2 | | |
| 工作温度（℃） | ＜250 | | |
| 抗压强度（MPa） | ＞30 | | |
| 抗折强度（MPa） | ＞6 | | |
| 耗气量 [$m^3$/（min·个）] | 0.17 | 0.20 | 0.23 |

注　耗气量数值指标准状态下。

（2）气化风机压力。气化板料侧压力不应大于根据式（6-16）计算得出的数值

$$p_F = 9.8 \rho h_w \tag{6-16}$$

式中　$\rho$——物料堆积密度，kg/$m^3$；

$h_w$——物料自然堆积锥体底部距离顶部的高度，mm。

关于风机形式，一般选择罗茨鼓风机作为气化风源，详见本书第五章。

以上气化风机压力的计算方法用于估算，如取得

相关物料特性参数，还可以根据附录N的计算方法较为精确地计算。

（3）空气电加热器计算

$$P_E = \frac{1.2 \times c_p Q_F \rho_b (t_2 - t_1)}{60} \quad (6\text{-}17)$$

式中　$P_E$——电加热器初算功率，kW；

$c_p$——空气平均比热容，取1.003kJ/（kg·℃）；

$\rho_b$——空气密度，取一个大气压，20℃时取1.2kg/m³；

$t_1$——电加热器进口温度，℃，常温取20℃（如靠近风机布置，取风机出口温度）；

$t_2$——电加热器出口温度，℃。

（4）空气电加热器选型，见图6-17和表6-5。

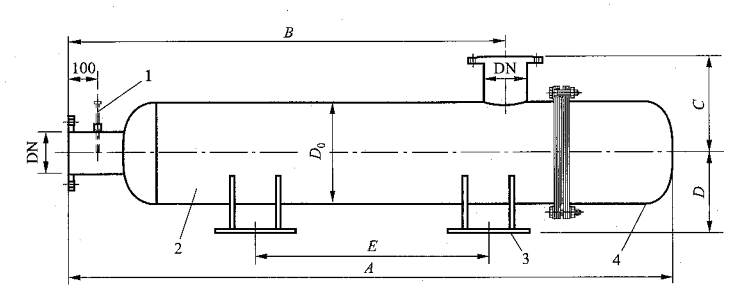



图6-17　空气电加热器外形、基础图

1—测温元件；2—壳体；3—底座；4—防护罩

表6-5　常用空气电加热器规格　（mm）

| 功率（kW） | $D_0$ | DN | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15～25 | 219 | 100 | 1900 | 1400 | 250 | 210 | 750 |
| 30～45 | 273 | 125 | 1945 | 1360 | 280 | 237 | 750 |
| 50～90 | 325 | 150 | 1950 | 1360 | 300 | 262 | 750 |

3. 锅炉除尘器灰斗气化风系统

（1）灰斗气化装置设计要求。

1）锅炉除尘器灰斗宜设气化装置。

2）气化装置数量按料性选取，一般每个灰斗设2～4块气化板，每块气化板面积宜为150m×300mm，用气量取0.17m³/min（标准状态下）。

3）气化装置应对称布置于灰斗下部。

4）气化板灰侧空气压力可按附录N计算得出（一般不小于40kPa）。

5）每个灰斗的进气管上宜安装风量调节装置。

（2）灰斗气化风机设计要求。

1）宜按1～2台炉为一个单元设计。

2）气化风机宜每台炉设1台，一个单元设1台公共备用气化风机。

3）风机压力宜为气化空气分支管线供气压力与最长管道阻力之和计算得出。

4）风机的总流量宜为每台炉除尘器灰斗气化空气风量总和的110%。

5）气化风系统宜设置专用空气电加热器，电加热器出口空气温度不低于150℃。

6）空气电加热器配置数量宜与风机相同。

7）空气电加热器及其后管道需保温。

## （五）配套设备选型

1. 排气过滤器

仓顶排气过滤器是收集料仓排出的含尘空气中的粉尘，使得料仓排气达标排放的设备。排气过滤器形式有很多，如旋风分离器、布袋除尘器、电除尘器等。目前应用最多的是布袋除尘器。下面就布袋除尘器布置选型进行说明。

（1）设计要求。

1）每座料仓顶一般设1套布袋除尘器。

2）排放浓度、最高允许排放速率等均应满足GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》等国家、地方环保标准要求，除尘效率一般不低于99.9%，排尘浓度一般不低于50mg/m³。

3）清灰方式宜采用自动脉冲反吹清扫系统。

4）过滤风速宜不大于0.8m/min。

5）滤袋材质宜为拒水防油、防电、耐酸、耐碱、耐磨损。滤袋及相关部件需承受料仓排气的最高温度，表6-6列出了部分物料的温度，排气温度可参考物料温度适当调整后选取。

表6-6　部分物料温度　（℃）

| 项目 | 介质温度 | 建议选型温度 | 备注 |
|---|---|---|---|
| 除尘器灰 | 约150 | 150 | 以入口烟气最高温度选型 |
| 省煤器、脱硝装置灰 | 300～400 | 350 | 以入口烟气最高温度选型 |
| 循环流化床底渣 | 120～150 | 150 | |
| 干渣 | 150 | 200 | |

续表

| 项目 | 介质温度 | 建议选型温度 | 备注 |
|---|---|---|---|
| 石灰石 | 常温 | 150 | |
| 石子煤 | 150 | 150 | |
| 床料 | 常温 | 常温 | 以底渣为床料时除外 |

注 表中数据只做缺少具体资料情况下参考用，应以具体工程实际数据为准。

6）布袋除尘器宜配带排尘风机。风机参数和运行方式保证料仓处于微负压状态。

7）布袋除尘器位置宜远离料仓进料口。

（2）选型计算。布袋除尘器处理风量，需考虑所有进入料仓的气量总和，并宜有10%的裕度

$$Q_B=(Q_C+Q_F+Q_S+Q_M+Q_o)\times110\% \quad (6\text{-}18)$$

式中 $Q_B$——布袋除尘器的处理风量，$m^3/min$；

$Q_C$——进入料仓的输送用气量，$m^3/min$；

$Q_F$——料仓底部气化风量或空气炮气量，$m^3/min$；

$Q_S$——进入料仓的分选系统气量，$m^3/min$；

$Q_M$——进入料仓的物料置换出的空气量，$m^3/min$；

$Q_o$——进入料仓的干灰散装机排尘风量，$m^3/min$。

过滤面积

$$S_B=\frac{Q_B}{v_B} \quad (6\text{-}19)$$

式中 $S_B$——布袋除尘器过滤面积，$m^2$；

$v_B$——布袋除尘器过滤风速，不大于0.8m/min。

（3）设备选型。常见布袋除尘器外形如图6-18所示。

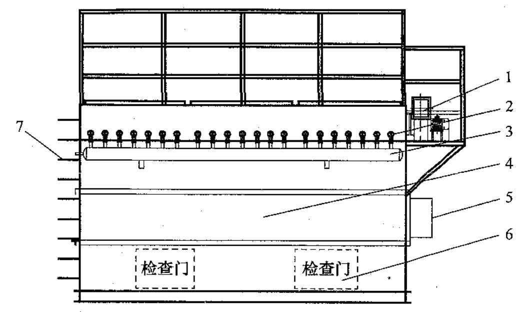



图6-18 脉冲布袋除尘器外形图

1—排尘风机；2—脉冲阀；3—气包；4—本体；5—电控箱；6—检查门；7—爬梯

表6-7是常见布袋除尘器参数，由于各厂家参数略有区别，仅供设计参考，最终应以厂家正式资料为准。

表6-7 常见布袋除尘器参数

| 过滤面积（$m^2$） | 过滤风速（m/min） | 布袋尺寸（mm×mm） | 处理风量（$m^3/h$） | 脉冲阀数量 | 外形尺寸（mm×mm） | 质量（t） | 电动机功率（kW） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19.2 | 0.8 | 130×2000 | 921 | 4 | 833×1273 | 0.73 | 2.2 |
| 28.8 | | | 1382 | 4 | 833×1813 | 0.82 | 2.2 |
| 38.4 | | | 1843 | 6 | 1193×1633 | 1.02 | 3 |
| 44.8 | | | 2150 | 7 | 1373×1633 | 1.08 | 3 |
| 51.2 | | | 2519 | 8 | 1553×1633 | 1.19 | 3 |
| 57.6 | | | 2457 | 9 | 1733×1633 | 1.38 | 3 |
| 64.0 | | | 3072 | 8 | 1553×1993 | 1.59 | 3 |
| 76.8 | | | 3686 | 12 | 2353×1633 | 1.86 | 4 |
| 88.0 | | | 4224 | 11 | 2173×1993 | 1.96 | 4 |
| 96.0 | | | 4608 | 12 | 2353×1993 | 2.03 | 4 |
| 112.0 | | | 5376 | 14 | 2713×1993 | 2.2 | 4 |
| 120.0 | | | 5760 | 15 | 2973×1993 | 2.27 | 4 |
| 128.0 | | | 6144 | 16 | 3153×1993 | 2.32 | 4 |
| 144.0 | | | 6912 | 18 | 3513×1993 | 2.5 | 7.5 |
| 160.0 | | | 7680 | 20 | 3953×1993 | 2.7 | 7.5 |
| 168.0 | | | 8064 | 21 | 4053×1993 | 2.85 | 7.5 |
| 184.0 | | | 8832 | 23 | 4493×1993 | 3 | 7.5 |
| 192.0 | | | 9216 | 24 | 4673×1993 | 3.3 | 15 |
| 200.0 | | | 9600 | 25 | 4933×1993 | 3.4 | 15 |
| 208.0 | | | 9984 | 26 | 5113×1993 | 3.5 | 15 |
| 232.0 | | | 11136 | 29 | 5653×1993 | 4.0 | 15 |

2. 人孔门

人孔门设计要求：

（1）一般不小于$\phi$500mm或500mm×500mm。

（2）人孔门一般布置于顶层的边沿，以方便进入仓体内壁的爬梯。

3. 压力真空释放阀

压力真空释放阀布置于料仓顶部，在压力或真空超过设定值时，自动打开泄压或进气，是料仓必备的保护设备。

（1）设计要求。

1）压力真空释放阀一般布置于顶层边沿。

2）压力真空释放阀也可兼作人孔门使用。

（2）设备选型，见表 6-8。

**表 6-8　508 型压力真空释放阀参数**

| 入口尺寸（mm） | 标准透气值（Pa） | | 最大透气值（Pa） | | 质量（kg） |
|---|---|---|---|---|---|
| | 压力 | 真空 | 压力 | 真空 | |
| 508 | 769 | 220 | 2636 | 880 | 98 |

安装示意如图 6-19 所示。

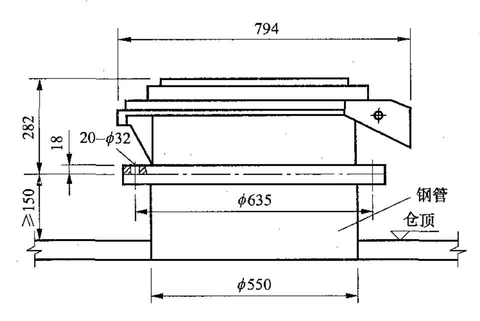



图 6-19　压力真空释放阀尺寸图

4. 料位计

（1）设计要求。

1）工程中较为常用的料位计有射频导纳、雷达、重锤式等，设计时根据需要选取。

2）料仓一般设置有高、低料位开关，连续料位计等。

3）料位计布置设计避免仓内落料区和气流密集区，以防止料位受干扰，影响料位精度。

（2）安装设计。部分形式的料位装置安装示意如图 6-20 所示。

## 三、平底料仓设计

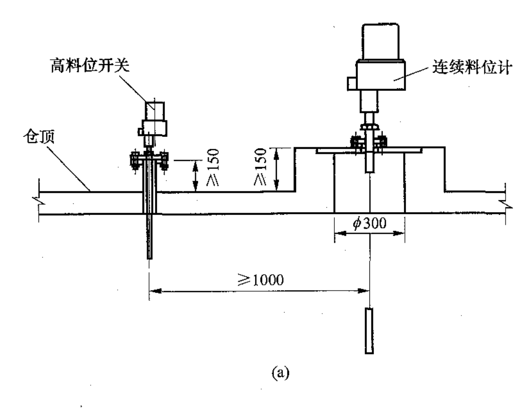
除灰专业平底料仓存储的物料大多是飞灰，故这里也将平底料仓直接称为灰库。

（一）总体说明

灰库同样分为四层（见图 6-21），即仓顶层、贮料层、运转层和零米层。

灰库各层的布置基本与锥底料仓相同，所不同的是灰库贮料层的底部布满了气化板，卸料口可装倒锥体等减压结构。

从制造材料上来说，常见的平底料仓是全钢筋混凝土结构的，也有少数采用全钢结构或 Lipp 筒结构。由于钢筋混凝土料仓在电厂应用最多，这里只针对钢筋混凝土结构料仓进行阐述。



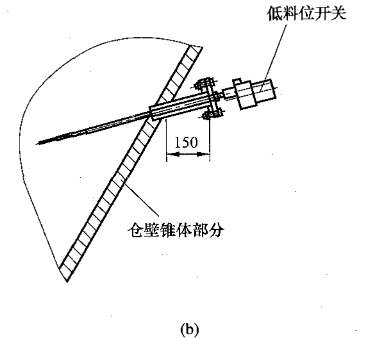




图 6-20　料位装置安装示意图

（a）仓顶料位装置；（b）仓壁料位装置

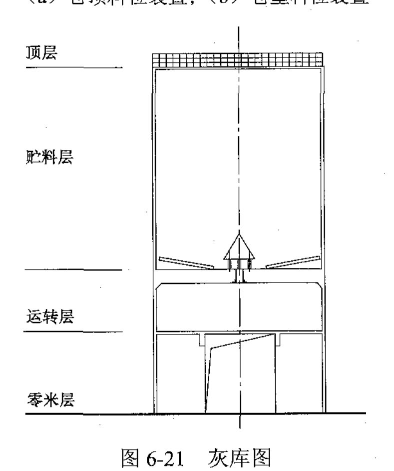



图 6-21　灰库图

（二）设计计算

1. 容积计算

灰库的结构尺寸可简化为 6-22 图。

有效容积由自然堆积的圆锥体料堆、圆柱体部分组成，可按式（6-20）计算

$$V_a = \frac{\pi D^2 h_1}{12} + \frac{\pi D^2 h_2}{4} = \frac{\pi D^3}{24}\tan\theta + \frac{\pi D^2 h_2}{4} \quad (6\text{-}20)$$

灰库总容积可按式（6-21）进行计算

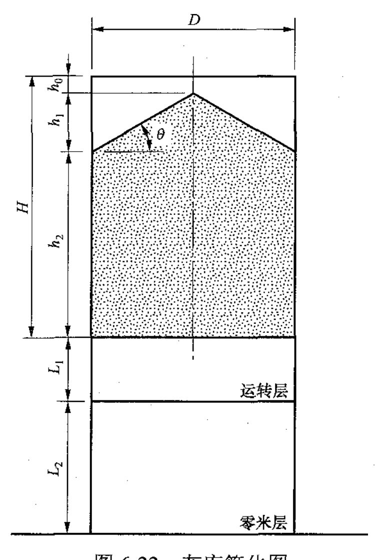



图 6-22　灰库简化图

$$V=\frac{\pi D^2 H}{4} \tag{6-21}$$

在设计工作中，通常是已知灰量和存储时间，求解单库所需的储存容积时，可按式（6-22）计算

$$V=\frac{tG}{n\beta\rho} \tag{6-22}$$

2. 外形尺寸计算

首先，选取灰库直径 $D$，通常可选取整数，则

$$H=\frac{4V}{\pi D^2} \tag{6-23}$$

或通过有效容积计算 $H$

$$H=\frac{4V_a}{\pi D^2}+\frac{D\tan\theta}{3}+h_0 \tag{6-24}$$

式中的数值同锥底料仓，通常按 1.5～2m 考虑。

卸料口距离运转层平台的高度取决于后续输送设备安装高度，且需要考虑运转层人员检修通行的净空要求。零米层净空取决于后续转运设备高度。最终得出料仓总高度

$$H_S=H+L_1+L_2 \tag{6-25}$$

3. 灰库直径与高度的关系

根据最小建造费用原则选取的灰库高径比为

$$H/D=1 \tag{6-26}$$

同样，必须指出：以上计算结果仅是从料仓的基建投资费用最经济的观点得出的，实际上还要考虑工程设计中的物料料性、具体布置条件、地质情况及系统运行的经济性等有关因素。

4. 荷载计算

料仓的荷载按式（6-27）计算

$$F=\rho V \tag{6-27}$$

式中　$\rho$——物料的堆积密度，t/m³，部分物料可查阅附录 B。

关于堆积密度的选取，参见锥底料仓部分。

（三）布置设计要求和选型

（1）顶层。

1）灰库之间应有连通平台，方便人员通行。

2）相邻灰库宜设置连通管道及阀门。

3）北方在环境计算温度低于–20℃的地区，灰库顶部设备阀门宜设防冻保温措施或采用室内布置。

4）其余要求参见锥底料仓部分。

典型的灰库顶层布置见图 6-23。

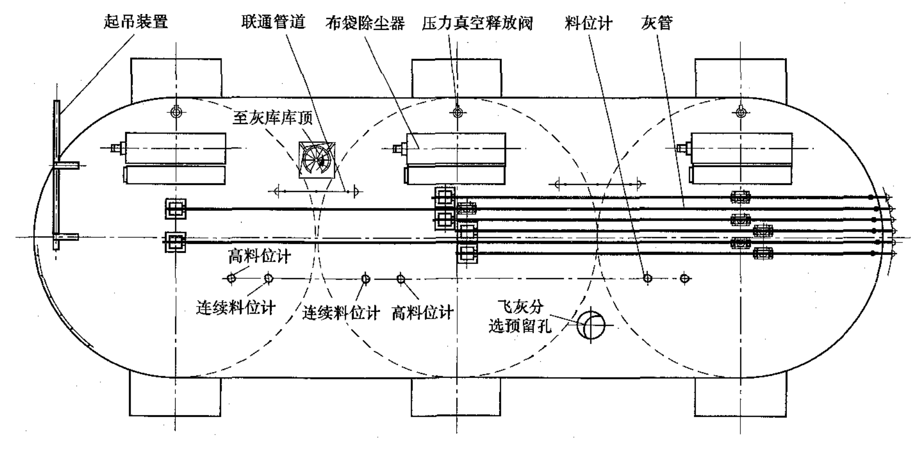



图 6-23　典型灰库顶层布置

（2）贮料层。

1）贮料层底部气化层布置要求详见“灰库气化系统”相关内容。

2）可在卸料口上方设置减压锥，防止灰堆积在卸料口上方区域，改善流态。图 6-24 所示为几种常见减压锥形式。

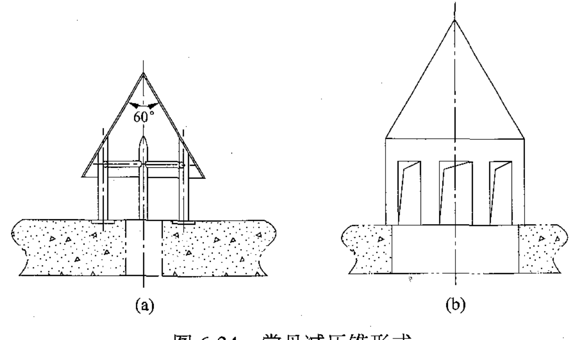


图 6-24 常见减压锥形式
（a）钢制减压锥（钢盖帽）；（b）混凝土减压锥

3）其余要求参见锥底料仓部分。

（3）运转层。

1）设备布置需综合考虑上方卸料口位置，以及下方装车车道布置要求等。

2）设备四周应有足够的操作及检修维护的空间。

3）运转层设施通常较大，需要设计时考虑初次设备安装的措施。

4）其余要求参见锥底料仓部分。

灰库运转层有大板梁结构和支柱结构两种形式，下面是几个典型的灰库运转层布置。

a. 大板梁结构。该结构灰库中间没有立柱，运转层设备空间和零米层装车空间不受限制，一般适用于容积小于 4000m$^3$、直径小于 15m、单车道的情况，见图 6-25。

b. 支柱结构。立柱将圆形灰库的运转层和零米层分隔成几个区域。设计时，需考虑立柱位置对设备及装车通道的影响，支柱结构灰库一般应用于容积大于 4000m$^3$、直径大于 15m、双车道的情况。

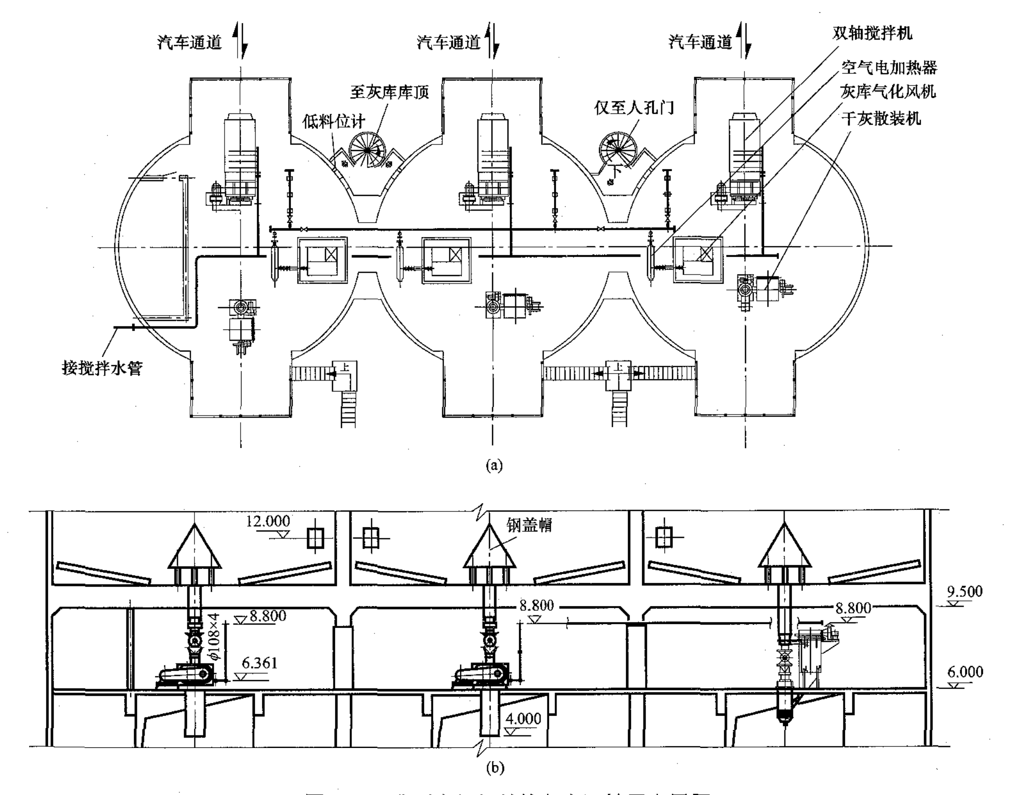


图 6-25 典型大板梁结构灰库运转层布置图
（a）平面图；（b）立面图

目前常见的支柱结构分为单排柱和双排柱两种。单排支柱形式的灰库，卸料装置布置需满足双车道装车要求，如图 6-26 所示。

双排支柱结构，卸料装置布置可单车道也可双车道装车，一般按双车道布置，如图 6-27 所示。

（4）零米层。零米层的布置要视料仓后续转运方式的不同而不同，作为中转仓，下部气力或者机械转运设备根据具体情况布置，下面主要叙述常见的汽车转运的方式。

1）灰库车道宜设置贯通式，每座灰库应设置独立车道，一般不设置多座灰库串联一条车道，以免多个装车点相互干扰，见图 6-28。

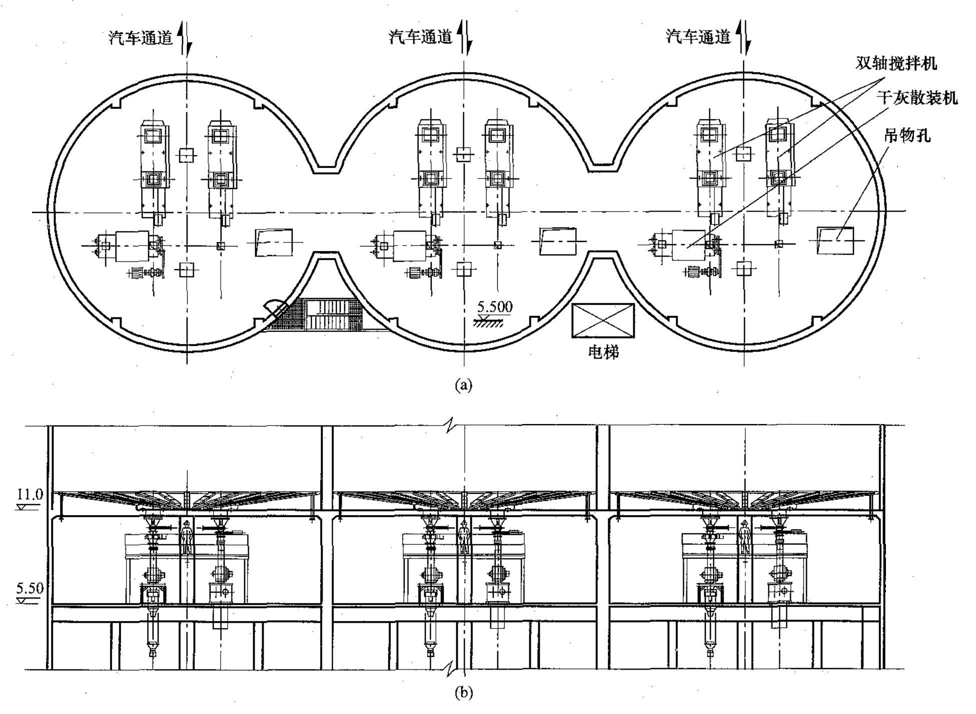



图6-26　典型单排支柱结构灰库布置
（a）平面图；（b）立面图

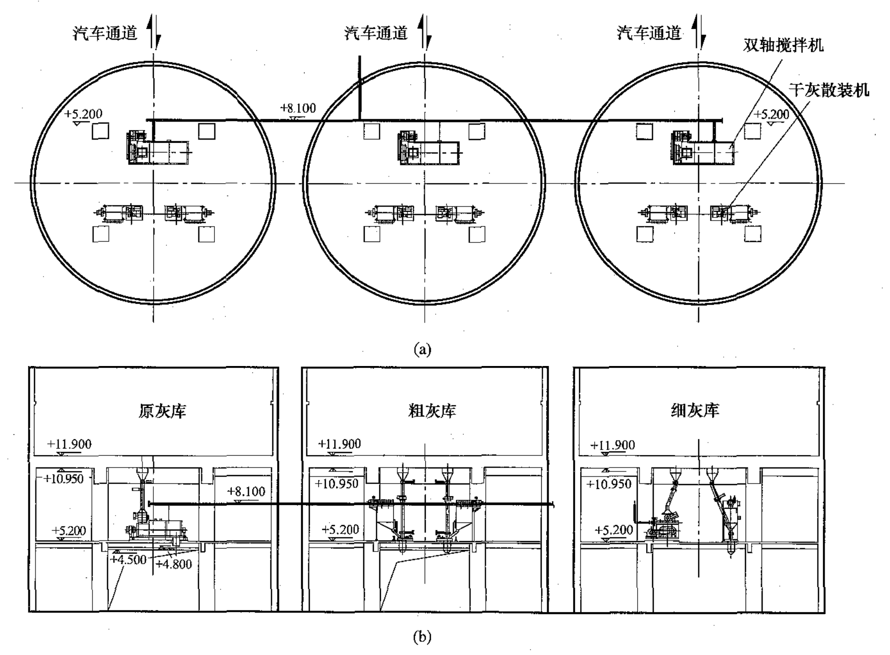



图6-27　典型双排支柱结构灰库布置
（a）平面图；（b）立面图

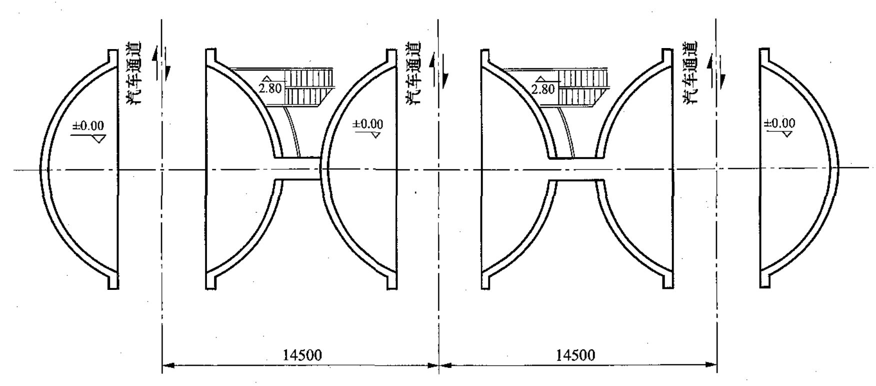



图 6-28　灰库零米层车道平面布置

2）车道空间能够满足可能进入的车辆的尺寸要求，具体尺寸要求可参见锥底料仓部分。常见灰库车道尺寸见图 6-29。

3）如灰库容积大，同时卸灰量要求大，可设置双车道，满足多车同时进料的要求，减少车辆排队等待时间，见图 6-30。

4）北方在环境计算温度低于−10℃的地区，灰库 0.00m 装车通道宜设大门，干灰调湿水管道阀门宜设伴热措施，如与采暖管道同沟布置、整体保温等，见图 6-31。

5）控制平台或控制室设计参见锥底料仓部分。图 6-32 所示为灰库控制室布置。

6）地面清扫。装车及转运过程洒落的灰，一般采用人工清扫、真空吸尘、地面冲洗等方案。在北方采暖区严禁采用水力清扫方式。人工清扫所需的洗手池应布置在卸料设备层。在非采暖区可采用水力清扫方式。

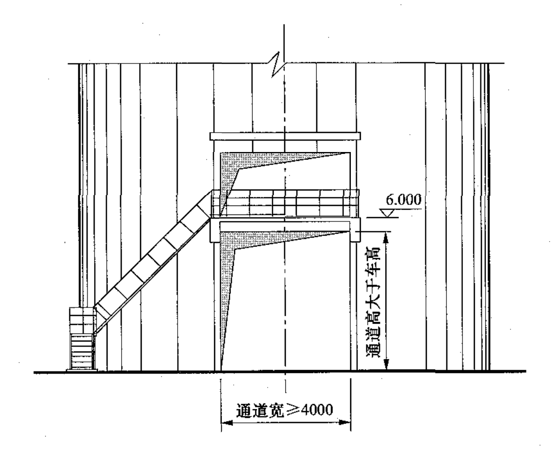



图 6-29　常见灰库车道尺寸

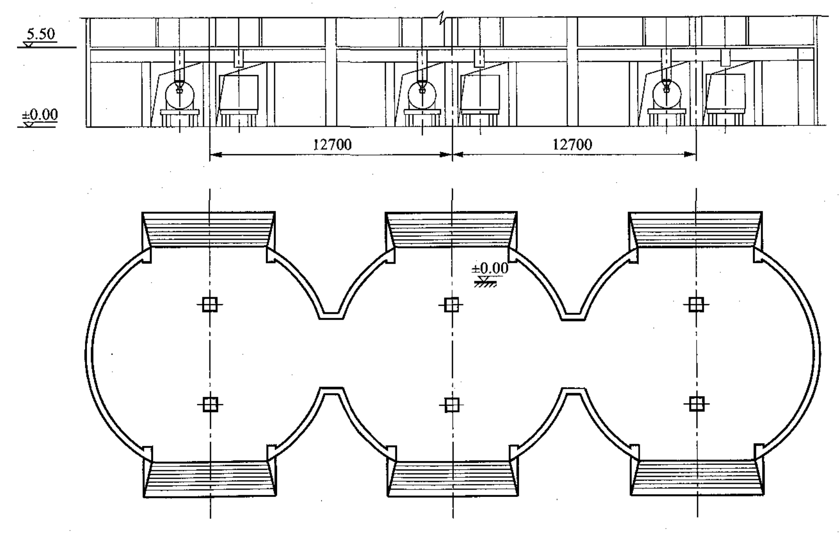



图 6-30　双车道 0m 布置

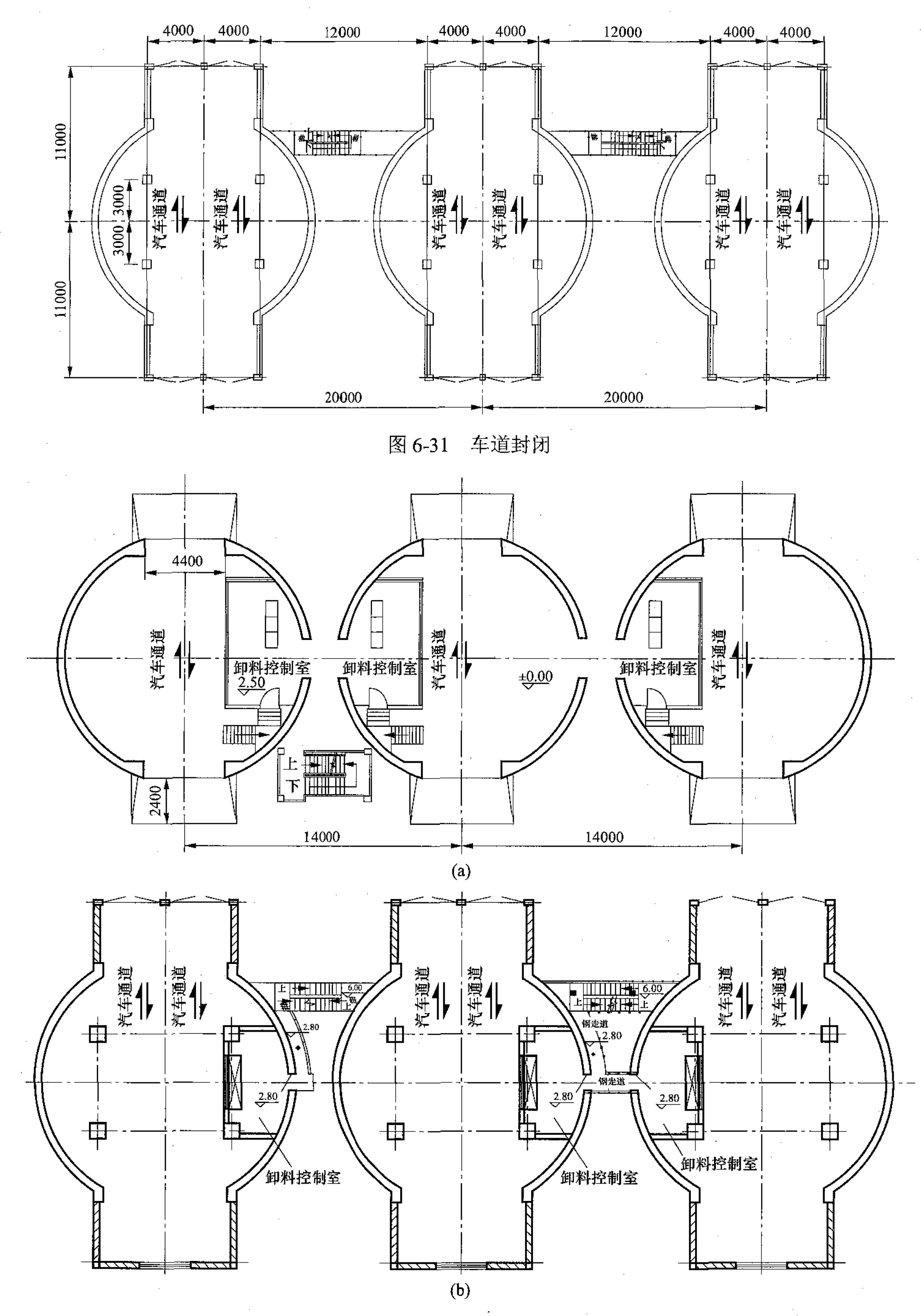



图 6-31 车道封闭

(a)

(b)

图 6-32 灰库控制室布置

（a）室内进入控制室；（b）室外进入控制室

（四）灰库气化系统

灰库气化系统目前常见的有两种：一种是全区气化系统；另一种是分区气化系统。

全区气化系统是指布置在储灰层的所有气化斜槽等气化装置，同时进气的系统。其特点是系统设计和运行简单，在灰库储灰较多时，效果不错，见图 6-33。

分区气化系统是指将气化斜槽按一定要求分成多组单元（一般 4 个以上），气化风通过每个单元进气管道上的电（气）动阀门控制，每一组（或多组）单元同时进气，只对工作单元上方区域进行气化，轮流切换下一组（或多组）单元。其特点是不全截面气化，气化风量小，节约气化风机和电加热器的功率，见图 6-34。

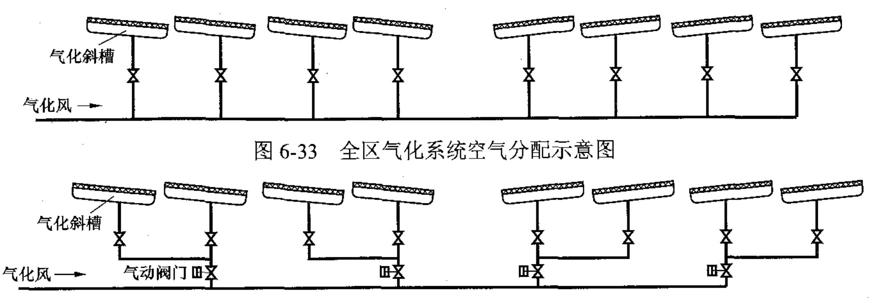



图 6-33　全区气化系统空气分配示意图

图 6-34　分区气化系统空气分配示意图

1. 设计要求

（1）气化斜槽设计要求。

1）气化斜槽应均匀分布在库底板上，总面积宜不小于库底截面积的 15%。

2）气化斜槽布置应尽量减少死区。

3）气化斜槽应从卸料口向四周呈发散状，并向卸料口倾斜，斜度宜为 6°。

4）库底设 2 个或多个卸料口时，如相邻卸料口间距大于 1.8m，卸料口间应分别布置朝各自卸料口倾斜的气化斜槽。

5）气化斜槽进气量应均匀稳定，进气支管可设调节阀门。

6）如果气化板是分区的，各分区的进气量应均匀稳定，并设有独立的气（电）动阀门，按设定时间自动控制。

（2）气源系统设计要求。

1）灰库气化风系统宜按一套灰库（1～4 座为宜）系统为一个单元设计。

2）气化风机宜每座灰库设 1 台，一个单元设 1 台公共备用气化风机。

3）空气电加热器宜每库设 1 台，宜就近布置，减少热损失。

4）空气电加热器及其后管道需保温。

5）典型的灰库气化系统流程图如图 6-35 所示。

2. 选型计算

（1）气化风机流量 $Q_F$，按式（6-28）计算

$$Q_F=(q_F S_F+0.17n)\times 110\% \qquad (6\text{-}28)$$

式中　$Q_F$——气化层所需风量，$m^3/min$；

$q_F$——单位面积气化板所需气量，通常取 $0.62m^3/(m^2\cdot min)$；

$S_F$——单仓气化板总面积，$m^2$，按式（6-29）计算；

$n$——卸料口气化箱个数，以 150mm×300mm 规格为例。

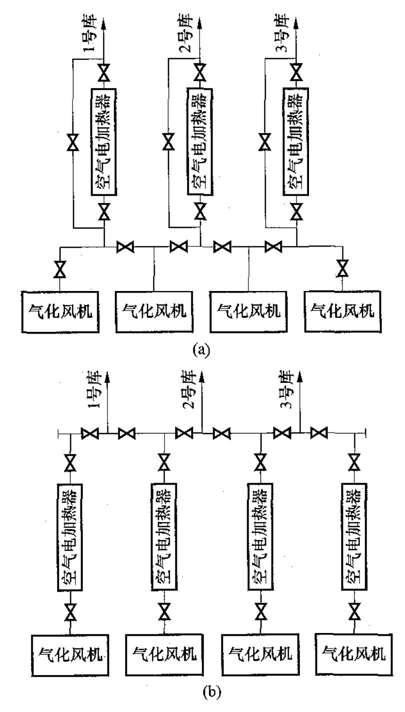



图 6-35　典型的灰库气化系统流程图

（a）方案一；（b）方案二

气化面积 $S_F$ 需要根据气化层具体布置统计得出

$$S_F=BL \qquad (6\text{-}29)$$

式中　$B$——气化板宽度，m，按表 6-9 选型；

$L$——气化板总长，m，由布置统计得出。

**表 6-9　常用气化斜槽规格**

| 规格 B（mm） | 总宽度（mm） | 气室宽度（mm） | 高度（mm） | 进气口尺寸 | L 系列 |
|---|---|---|---|---|---|
| 150 | 225 | 110 | 86 | G1″ | 用户定制 |
| 175 | 245 | 135 | 92 | | |
| 200 | 270 | 160 | 100 | | |

（2）气化风机压力。气化风机压力根据式（6-16）估算，如取得相关物料特性参数，还可以根据附录 N

的计算方法较为精确地计算。

3. 布置设计

图 6-36～图 6-39 所示为典型的气化斜槽布置图，供设计时参考。

（五）配套设备选型

灰库配套设备及其选型与锥底料仓相同，这里不再赘述。

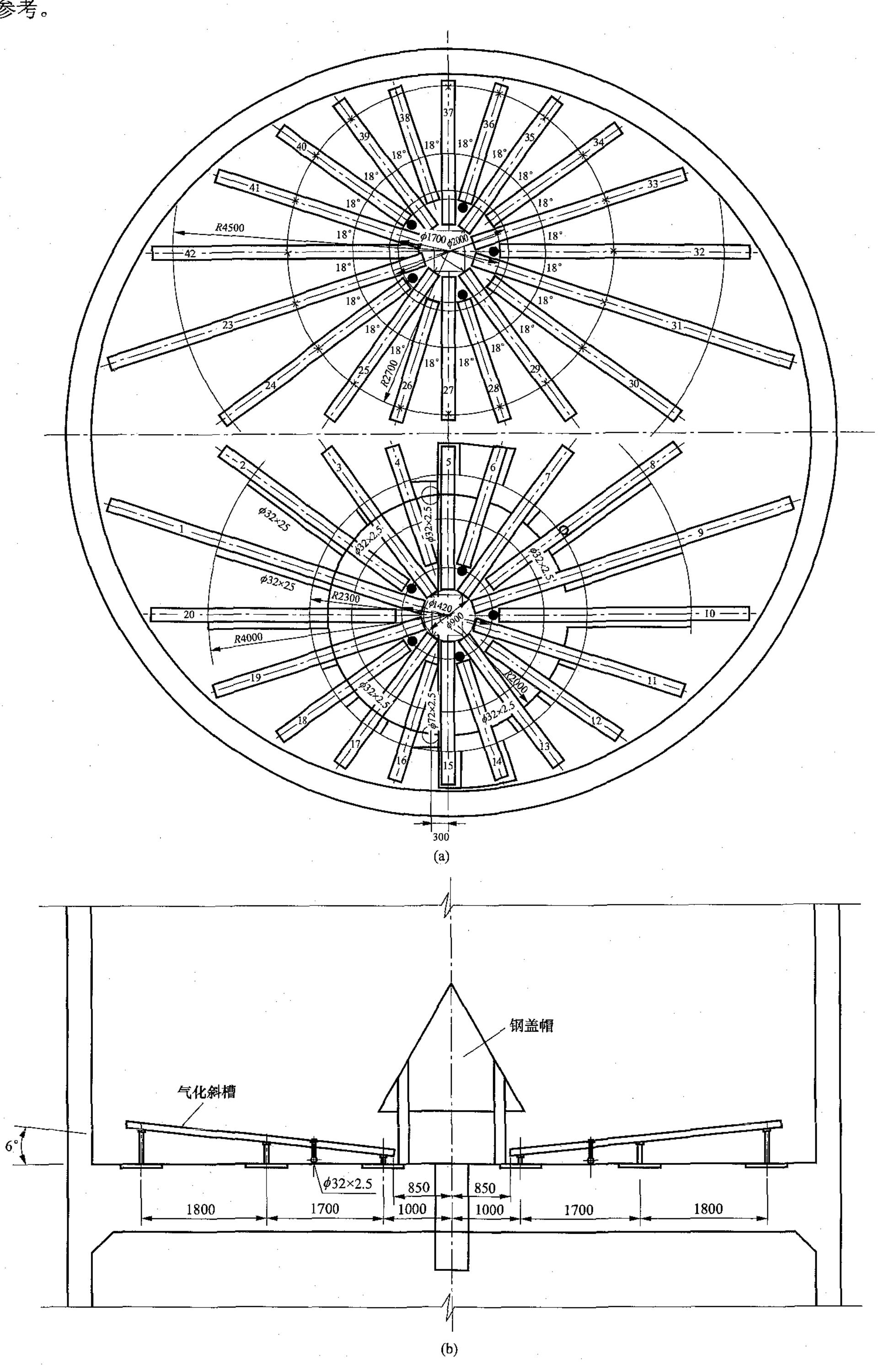



图 6-36　两个卸料口气化层布置图

（a）平面图；（b）立面图

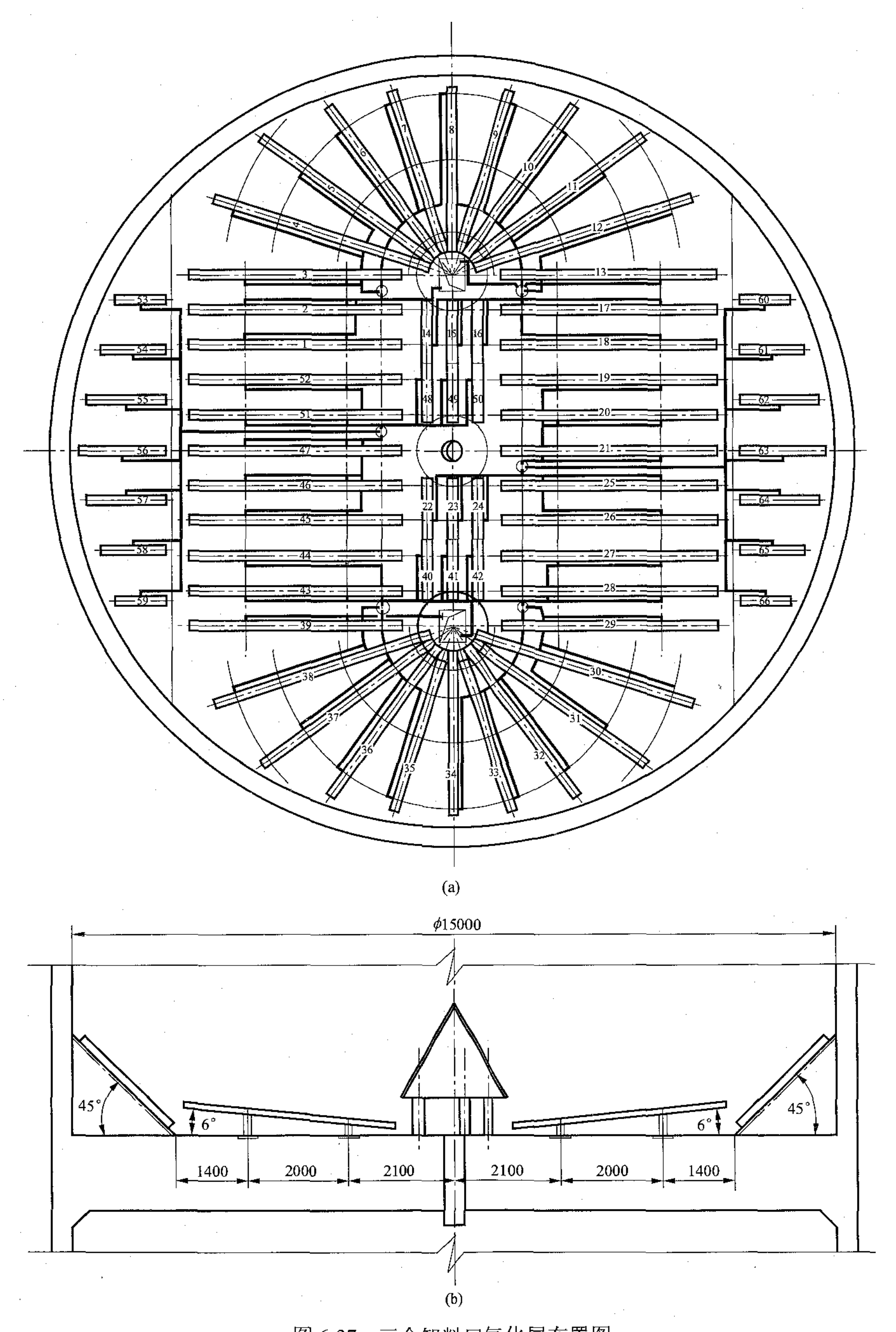



图 6-37　三个卸料口气化层布置图

（a）平面图；（b）立面图

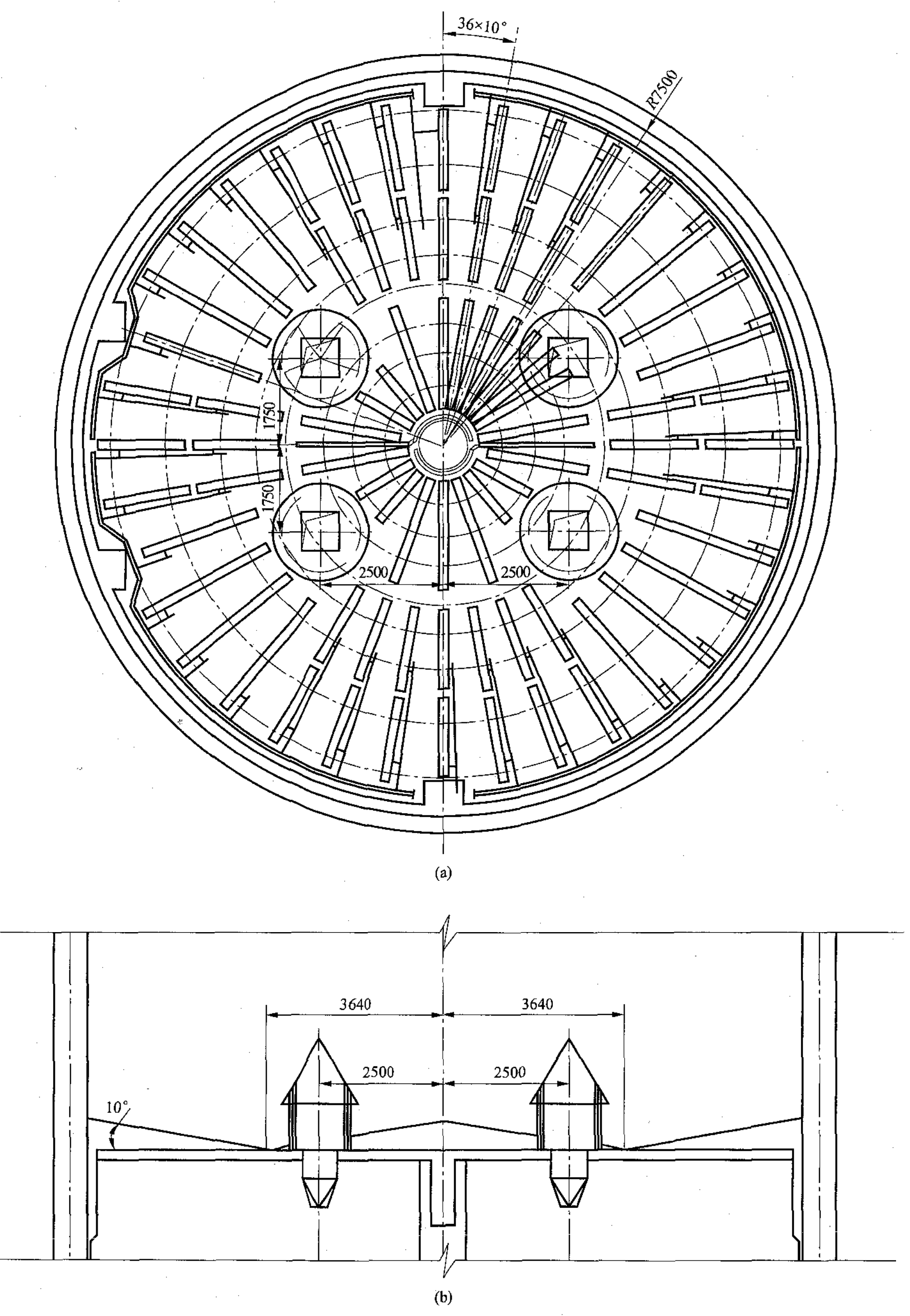



图 6-38　双车道气化层布置图

（a）平面图；（b）立面图

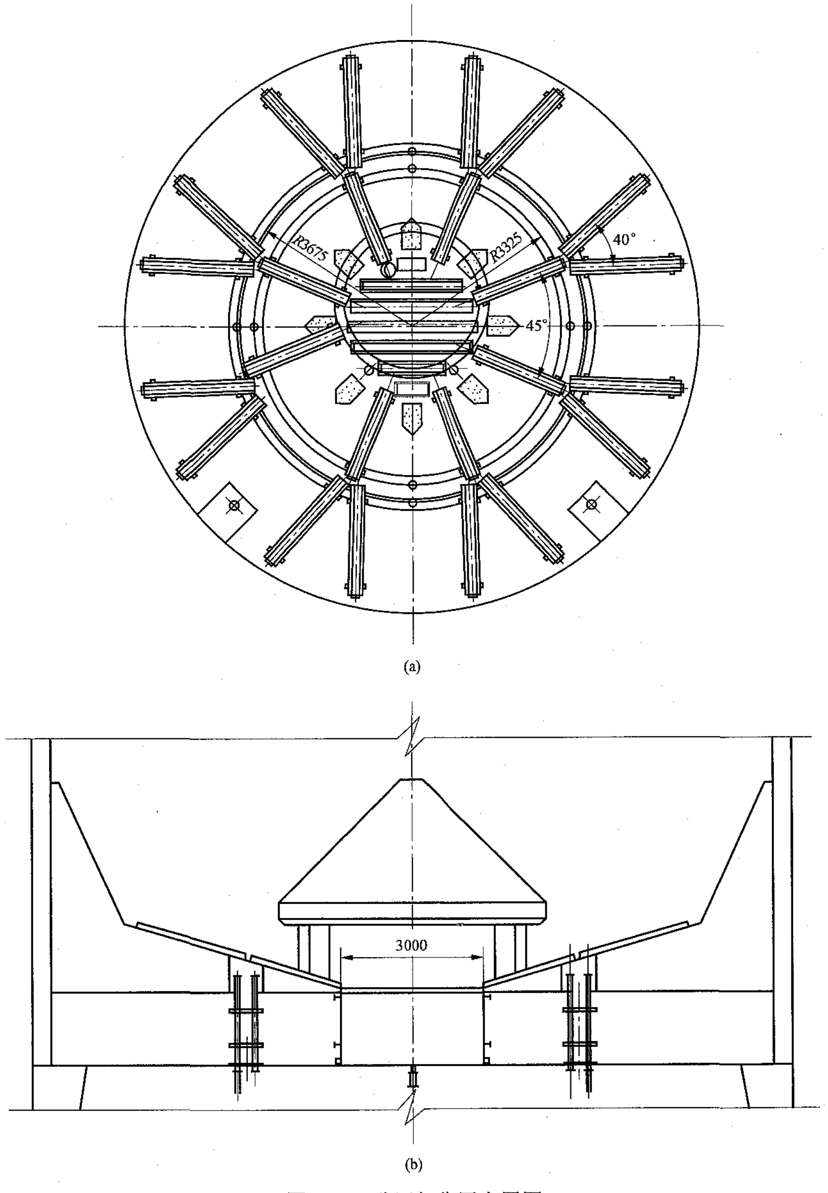



图 6-39　分区气化层布置图
（a）平面图；（b）立面图

# 第三节　卸　料　系　统

卸料系统是将物料从存储系统转运至下游输送设施的系统。其设计范围从料仓卸料口开始，到下游转运设备入口为止。

卸料系统根据系统需求、综合利用条件等选取，通常可分为干式卸料系统、湿式卸料系统，用于厂外汽车运输方式。

## 一、设计要求

（1）料仓的卸料过程应考虑防尘措施，对环境不造成污染。

（2）灰渣需要装车外运时，宜设置卸料设备。

（3）灰渣转运至干式贮灰场堆放时，应采用湿式卸料设备。搅拌水量一般为灰或渣量的 15%～30%，水量应连续可调。

常见的卸料系统图如图 6-40 所示。

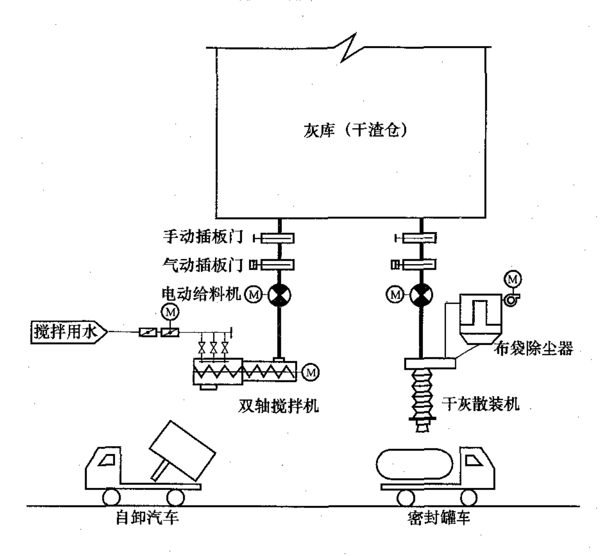



图 6-40　常见的卸料系统图

## 二、设计计算

卸料系统的出力，与物料量、运输距离、汽车数量等因素相关，首先初步选定卸料系统出力 $G$，代入式（4-16）计算并通过以下复核计算，最终确定。

1. 每班内汽车周转的次数

$$n=\frac{60t}{t_1} \tag{6-30}$$

式中　$n$——每班内每台汽车周转的次数，次，取整数；

$t$——每班法定工作时间，h，一班制可取 6.5～7.0h，两班制可取 6.0～6.5h；

$t_1$——自卸汽车周转一次所需时间，min 见式（4-15）。

2. 每台卸料装置每天的运行总时间

$$t_s=\frac{CNk_3nt_z}{60n_x} \tag{6-31}$$

式中　$C$——每天工作班数，班/天；

$N$——汽车数量，台，见式（4-18）；

$k_3$——汽车出车率，%，可取 80%；

$t_z$——装车时间，min，见式（4-16）；

$n_x$——卸料系统中，可以同时装车的卸料设备总台数，台。

3. 判定

如果 $t_s>Ct$，且有一定余量时（主要考虑司机吃饭、休息等），即卸料系统出力不能保证在正常工作时间内完成工作，需重新选取更大出力 $G$ 的卸料装置或增加卸料装置数量 $n_x$，返回式（6-30）中，再重复进行计算，直到 $t_s<Ct$。

## 三、设备选型

### （一）双轴搅拌机

双轴搅拌机是利用两组带有螺旋叶片的轴同步相对转动，将物料向前输送，在输送过程中，水通过设置于上方的雾化喷嘴均匀地加入搅拌的物料中，从而调节物料湿度，避免装卸过程中，粉状物料的飞扬。

双轴搅拌机结构见图 6-41，外形尺寸及基础图见图 6-42，常用双轴搅拌机的主要技术参数见表 6-10。

典型的双轴搅拌机从进料口开始一般设有手动隔离阀、气动关断阀、均匀给料设备（如电动给料机），出料口设卸料管。双轴搅拌机安装图如图 6-43 所示。

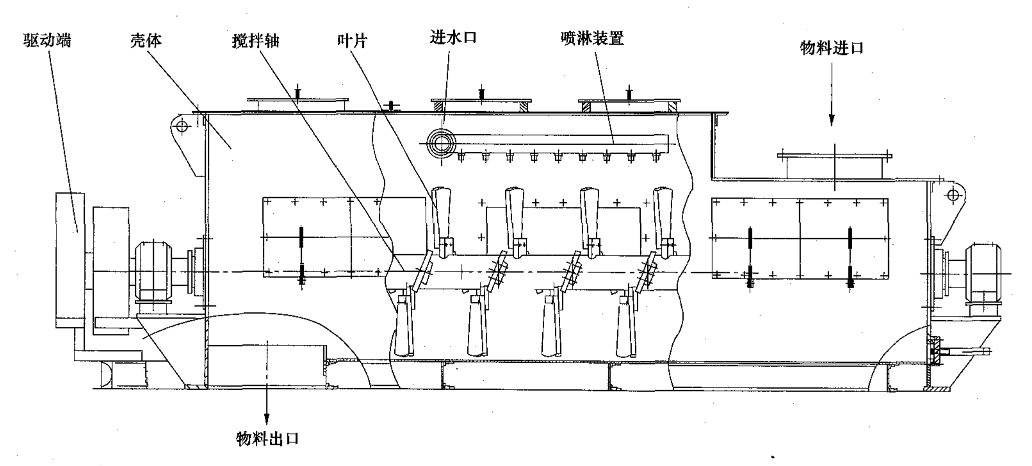



图 6-41　双轴搅拌机结构图

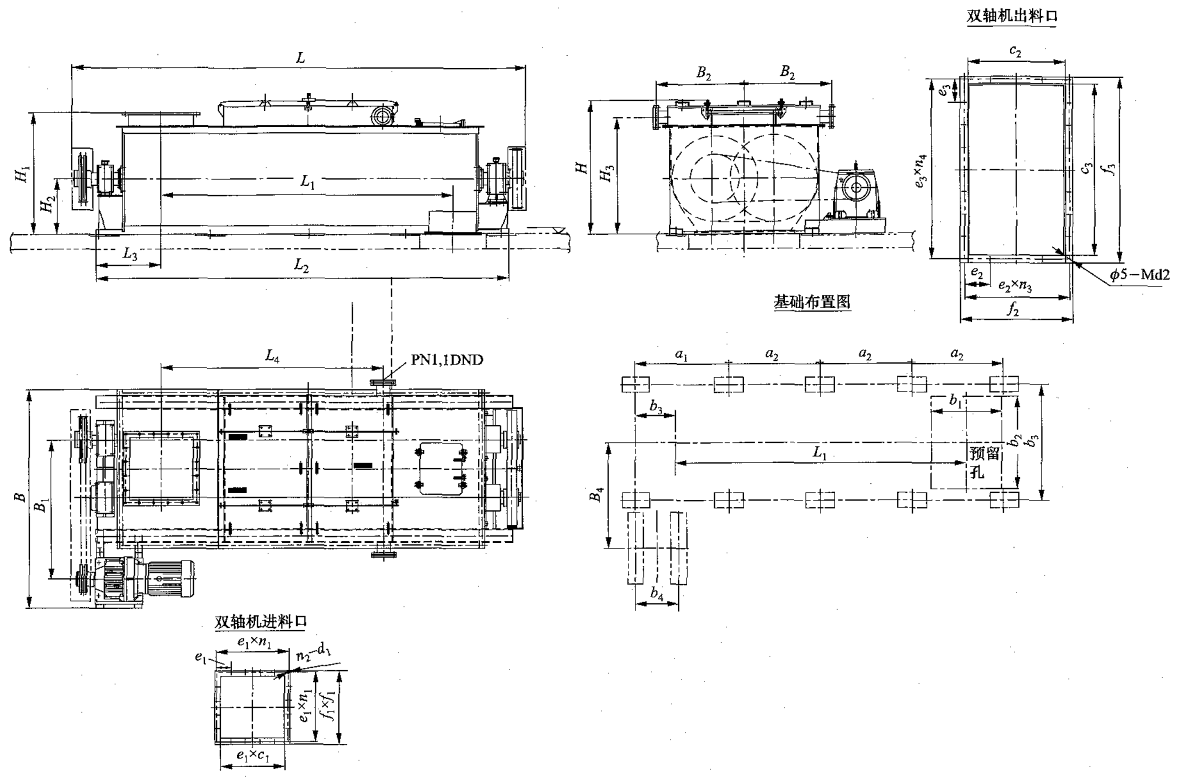



图 6-42　双轴搅拌机外形尺寸及基础图

**表 6-10**　　　　**双 轴 搅 拌 机 参 数 表**

| 型　号 | | XSJ-60 | XSJ-80 | XSJ-100 | XSJ-150 | XSJ-200 | XSJ-250 | XSJ-300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 出力（t/h） | | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 叶片轴直径（mm） | | 500 | 600 | 720 | 760 | 800 | 900 | 960 |
| 进水水压（MPa） | | 0.4～0.6 | | | | | | |
| 湿灰含水率（%） | | 15～25 | | | | | | |
| 电动机功率（kW） | | 11 | 15 | 22 | 30 | 37 | 45 | 45 |
| 设备外形连接尺寸（mm） | $L×B×H$ | 3880×1755×1050 | 3905×1905×1075 | 3965×2105×1275 | 4365×2175×1275 | 4588×2220×1280 | 4678×2290×1455 | 5295×2410×1560 |
| | $L_1$，$L_2$ | 2400，3050 | 2500，3285 | 2600，3613 | 3000，4013 | 3000，4140 | 3000，4240 | 3600，4850 |
| | $L_3$，$L_4$ | 485，1580 | 505，1650 | 523，1796 | 523，1896 | 634，1890 | 657，2270 | 680，2450 |
| | $B_1$，$B_2$ | 1250，700 | 1285，745 | 1345，805 | 1345，805 | 1380，820 | 1460，905 | 1580，965 |
| | $B_3$，$B_4$ | 984，980 | 1024，1050 | 1224，1110 | 1224，1110 | 1260，1130 | 1403，1156 | 1523，1210 |
| | $H_1$，$H_2$ | 975，410 | 1020，425 | 1090，480 | 1090，480 | 1150，498 | 1260，580 | 1325，650 |
| | $H_3$，$D$ | 925，65 | 950，80 | 1030，80 | 1030，80 | 1100，100 | 1220，125 | 1280，125 |
| | $c_1×c_1$ | 400×400 | 450×450 | 500×500 | 500×500 | 580×580 | 650×650 | 700×700 |

续表

| 型　号 | | XSJ-60 | XSJ-80 | XSJ-100 | XSJ-150 | XSJ-200 | XSJ-250 | XSJ-300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 设备外形连接尺寸（mm） | $f_1 \times f_1$ | 540×540 | 590×590 | 640×640 | 640×640 | 700×700 | 775×775 | 825×825 |
| | $e_1 \times n_1$ | 117.5×4 | 130×4 | 119×5 | 119×5 | 131×5 | 146×5 | 153×5 |
| | $n_2$-$d_1$ | 16-$\phi$14 | 16-$\phi$16 | 20-$\phi$18 | 20-$\phi$18 | 20-$\phi$18 | 20-$\phi$22 | 20-$\phi$22 |
| | $c_2 \times c_3$ | 400×650 | 400×720 | 420×840 | 420×840 | 450×852 | 504×950 | 525×1060 |
| | $f_2 \times f_3$ | 480×730 | 480×800 | 500×920 | 500×920 | 570×932 | 585×1030 | 605×1140 |
| | $e_2 \times n_3$ | 110×4 | 110×4 | 115×4 | 115×4 | 131×4 | 138×4 | 141×4 |
| | $e_3 \times n_4$ | 138×5 | 152×5 | 175×5 | 175×5 | 111.5×8 | 125×8 | 137.5×8 |
| | $n_5$-$d_2$ | 18-M10 | 18-M12 | 18-M12 | 18-M12 | 24-M12 | 24-M12 | 24-M12 |
| | $a_1 \times a_2$ | 750×720 | 850×830 | 865×845 | 965×945 | 985×1000 | 1150×1000 | 1300×1150 |
| | $b_1 \times b_2$ | 660×890 | 660×960 | 680×1000 | 680×1000 | 720×1080 | 700×1150 | 750×1250 |
| | $b_3 \times b_4$ | 460×400 | 480×405 | 500×410 | 510×420 | 570×420 | 413×440 | 450×500 |

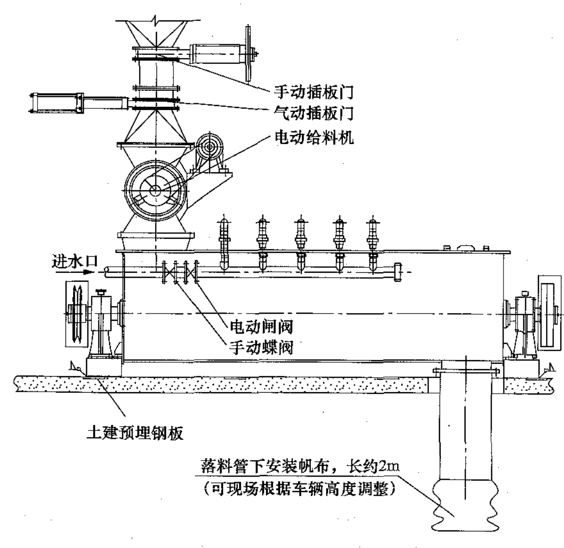



图 6-43　双轴搅拌机安装图

## （二）干灰散装机

干灰散装机，是将干态粉状物料输出至车船等设施的装置。设备以升降电动机驱动轮滑组件，带动可伸缩的散装头下降至转运设施的罐体接口开始卸料，排尘风机将卸料过程中罐体内的置换含尘空气通过排尘管吸入料仓或者布袋除尘器，同时由于排料口为负压，卸料过程粉尘不外溢。当罐体料满后，散装机头部的料位器联锁停止向罐体卸料。

干灰散装机结构见图 6-44，外形尺寸及基础图见图 6-45，常用干灰散装机的参数见表 6-11。

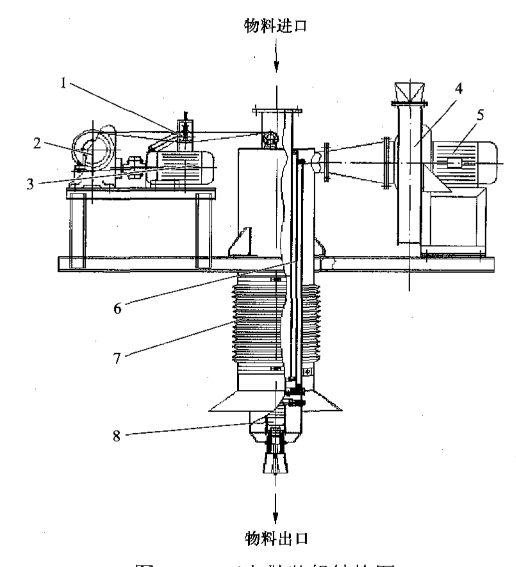



图 6-44　干灰散装机结构图

1—滑轮组件；2—减速机；3—升降电动机；4—排尘风机；5—风机电动机；6—伸缩料管；7—排尘管；8—料位器

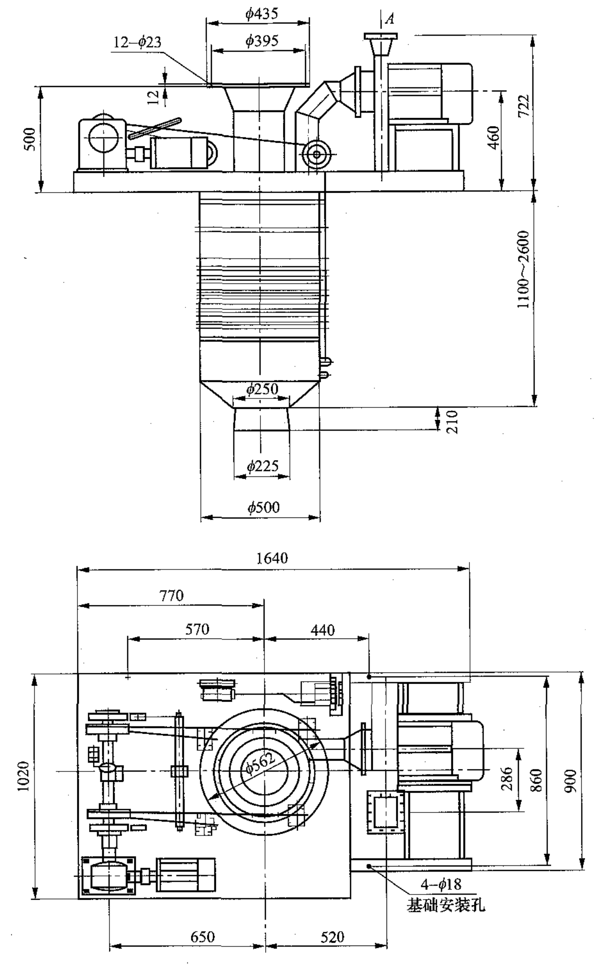



图 6-45　干灰散装机外形尺寸及基础图

**表 6-11　　常用干灰散装机的参数**

| 型号参数 | SZ-25 |
|---|---|
| 卸料口直径（mm） | 200 |
| 装车能力（t/h） | 80～100 |
| 散装头升降速度（m/min） | 9 |
| 散装头升降行程（m/min） | 1500 |
| 散装头升降电动机功率（kW） | 0.55 |
| 风机流量（$m^3/h$） | 800～1400 |
| 风压（Pa） | 3500 |
| 风机电动机功率（kW） | 3 |
| 控制方式 | 手动/自动 |

与双轴搅拌机类似，从进料口开始一般设有手动隔离阀、气动关断阀、均匀给料设备（如电动给料机）。直通式干灰散装机还需安装排尘粉管。典型的干灰散装机安装图如图 6-46 和图 6-47 所示。

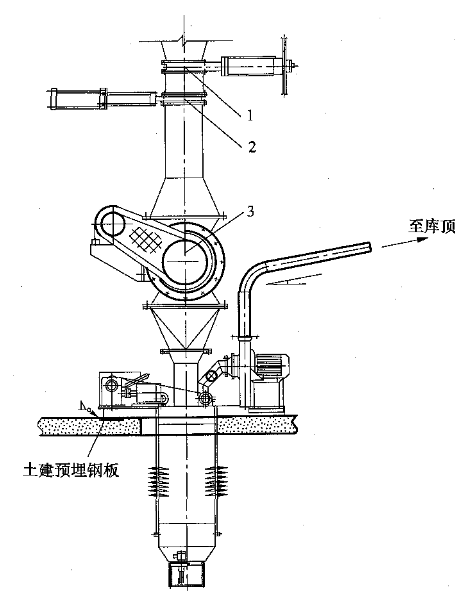



图 6-46　直通式干灰散装机安装图

1—手动插板门；2—气动插板门；3—电动给料机

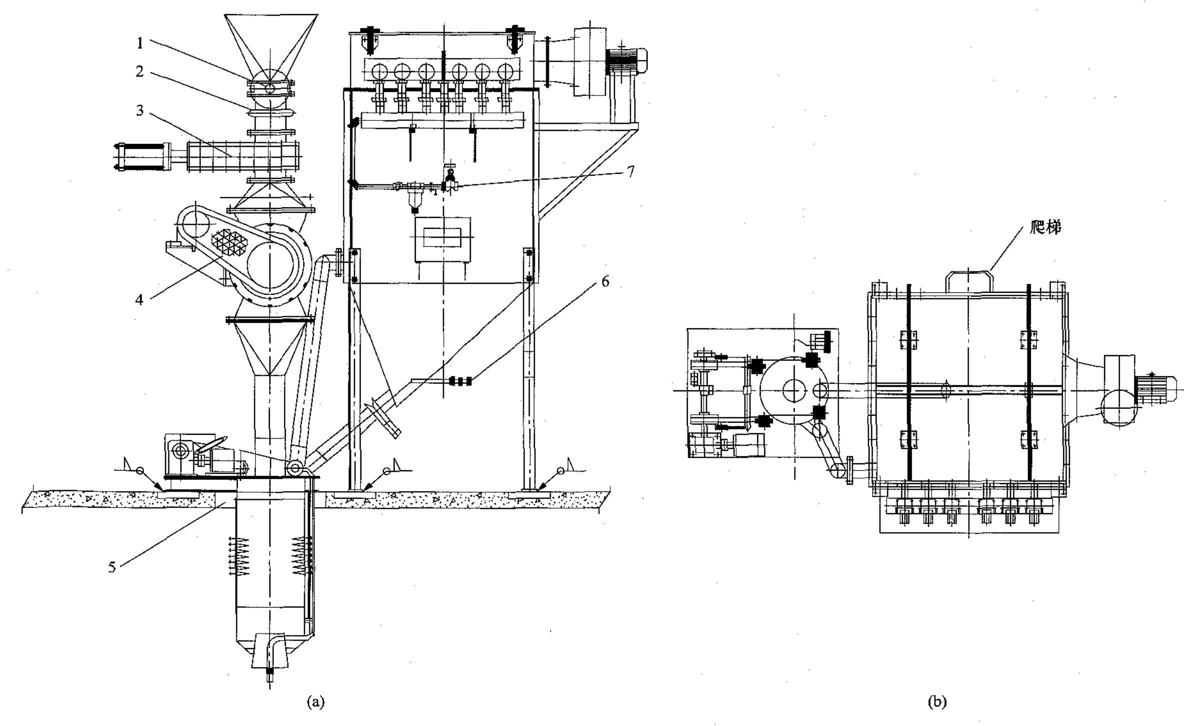



图 6-47　布袋除尘器式干灰散装机安装图

（a）立面图；（b）平面图

1—手动插板门；2—伸缩节；3—气动双阀板阀；4—电动给料机；5—平台开孔；6—喷吹用气 G1″；7—仪用气进口 G3/4″

## 四、布置设计

（1）设备布置在料仓的运转层，应结合料仓卸料口、下游转运设备装车需要等因素，合理布置。

（2）卸料系统大多采用库底进料的方式，宜一个料仓卸料口设一套卸料设备。

（3）卸料系统进料管应尽量垂直，如确实需要倾斜，进料管中心线与水平面夹角应大于物料安息角（对于粉煤灰、渣，一般宜不小于 60°）。

（4）卸料系统的进料管宜按图 6-48 分别设置手动、气（电）动插板门、电动给料机等。

（5）料仓结构有热位移时，如干渣仓，卸料系统进料管应有吸收热位移的措施。

（6）应考虑进料管上阀门和均匀给料设备的操作和检修便利。例如，在进料管上安装管接头或柔性接头。

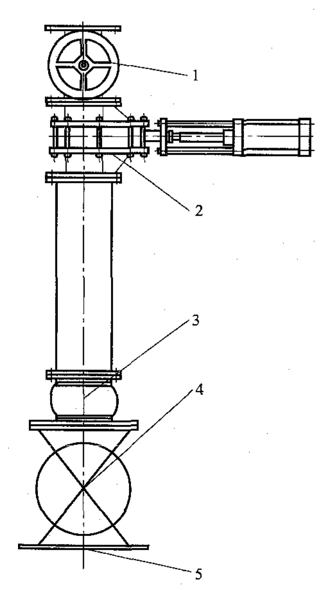



图 6-48　进料管安装快速管接头

1—手动插板阀；2—气动插板阀；3—快速管接头；4—电动给料机；5—接卸料设备

# 第七章

# 除灰渣系统选择案例

以某 2×1000MW 等级工程为例，详细介绍除灰渣系统的选择及方案的比选。工程已成功投运，现场运行情况良好，文中有关数据特别是经济性相关数据均按当时当地的数据取值，仅作参考，不作为其他工程设计的依据。

## 一、主要原始资料及工程条件

### （一）主要工程条件

1. 工程建设规模

工程规划容量 4×1050MW，本期工程拟建设 2×1050MW 超超临界燃煤发电机组，同步建设烟气脱硫、脱硝装置。三大主机采用东方电气有限公司设备，锅炉采用超超临界参数、变压运行、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、全露天布置、全钢架悬吊结构的π型单炉膛直流锅炉。

2. 当地主要气象特征值

多年平均气压：992.5hPa

多年平均气温：18.2℃

多年平均相对湿度：81%

多年平均年水汽压：18.0hPa

多年平均年降水量：1200.6mm

多年平均年蒸发量：736.8mm

多年平均风速：0.8m/s

多年最大积雪深度：5cm

3. 除尘器的形式及其排灰方式

每台炉配两台三室五电场静电除尘器。每台炉对应电除尘器按 60 个灰斗设计。

4. 燃烧制粉系统

采用中速磨煤机，每炉配 6 台磨煤机，5 运 1 备。

5. 灰场

工程灰场实际运灰距离约为 11.8km。

### （二）设计原始资料

1. 锅炉燃料资料（见表 7-1 和表 7-2）

**表 7-1　煤质及灰分分析表**

| 分类 | 名称 | 符号 | 单位 | 设计煤种 | 校核煤种 1 | 校核煤种 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 元素分析 | 收到基碳 | $C_{ar}$ | % | 61.1 | 54.44 | 58.99 |
| | 收到基氢 | $H_{ar}$ | % | 3.16 | 2.34 | 3.57 |
| | 收到基氮 | $N_{ar}$ | % | 0.59 | 0.48 | 0.80 |
| | 收到基氧 | $O_{ar}$ | % | 10.7 | 9.3 | 8.64 |
| | 收到基硫 | $S_{ar}$ | % | 0.16 | 0.78 | 0.53 |
| | 收到基水分 | $M_{ar}$ | % | 13.7 | 16.1 | 10.5 |
| | 收到基灰分 | $A_{ar}$ | % | 10.59 | 16.56 | 16.97 |
| | 干燥无灰基挥发分 | $V_{daf}$ | % | 32.42 | 29.13 | 38.51 |
| | 收到基低位发热量 | $Q_{net,ar}$ | MJ/kg | 22.24 | 19.39 | 22.21 |
| | 哈氏可磨性系数 | HGI | | 62 | 84 | 52 |
| 灰分析 | 二氧化硅 | $SiO_2$ | % | 41.14 | 41.43 | 58.69 |
| | 三氧化二铝 | $Al_2O_3$ | % | 18.16 | 13.53 | 18.99 |
| | 三氧化二铁 | $Fe_2O_3$ | % | 11.61 | 12.67 | 6.48 |

续表

| 分类 | 名称 | 符号 | 单位 | 设计煤种 | 校核煤种 1 | 校核煤种 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 灰分析 | 二氧化钛 | $TiO_2$ | % | 0.88 | 0.69 | 1.17 |
| | 氧化钙 | CaO | % | 13.11 | 13.87 | 7.26 |
| | 氧化镁 | MgO | % | 5.92 | 5.47 | 1.85 |
| | 氧化钠 | $Na_2O$ | % | 2.65 | 2.6 | 1.10 |
| | 氧化钾 | $K_2O$ | % | 2.11 | 1.8 | 2.03 |
| | 三氧化硫 | $SO_3$ | % | 3.35 | 7.22 | 1.40 |
| 灰熔点 | 变形温度 | DT | $\times 10^3$℃ | 1.15 | 1.16 | 1.15 |
| | 软化温度 | ST | $\times 10^3$℃ | 1.16 | 1.18 | 1.18 |
| | 流动温度 | FT | $\times 10^3$℃ | 1.18 | 1.2 | 1.2 |
| 灰比电阻 | 测试温度 31℃ | | Ω·cm | $1.82 \times 10^9$ | $5.00 \times 10^8$ | $5.00 \times 10^8$ |
| | 测试温度 80℃ | | Ω·cm | $4.35 \times 10^9$ | $1.30 \times 10^9$ | $3.10 \times 10^9$ |
| | 测试温度 100℃ | | Ω·cm | $2.90 \times 10^{10}$ | $9.75 \times 10^9$ | $2.41 \times 10^{10}$ |
| | 测试温度 120℃ | | Ω·cm | $1.71 \times 10^{11}$ | $7.50 \times 10^{10}$ | $1.23 \times 10^{11}$ |
| | 测试温度 150℃ | | Ω·cm | $4.60 \times 10^{11}$ | $3.30 \times 10^{11}$ | $3.50 \times 10^{11}$ |
| | 测试温度 180℃ | | Ω·cm | $1.65 \times 10^{11}$ | $6.70 \times 10^{10}$ | $1.80 \times 10^{11}$ |

**表 7-2　单台锅炉 BMCR 工况耗煤量及机械未完全燃烧损失 $q_4$**

| 项目 | 设计煤种 | 校核煤种 1 | 校核煤种 2 |
|---|---|---|---|
| 小时耗煤量（t/h） | 388 | 443 | 387 |
| 机械未完全燃烧损失 $q_4$ | 0.3% | 0.6% | 0.5% |

2. 机组年利用小时数

机组年利用小时数为 5000h。

### （三）锅炉灰渣量和石子煤量

按设计、校核煤种锅炉 BMCR 工况分别计算，灰渣量见表 7-3。

**表 7-3　灰　渣　量**

| 项目 | | 小时灰渣量（t/h） | | | | 年灰渣量（$\times 10^4$t/a） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 灰 | 渣 | 石子煤 | 合计 | 灰 | 渣 | 石子煤 | 合计 |
| 1 台炉 | 设计煤种 | 37.67 | 4.19 | 3.88 | 45.74 | 18.84 | 2.1 | 1.94 | 22.88 |
| | 校核煤种 1 | 67.39 | 7.49 | 4.43 | 79.31 | 33.70 | 3.75 | 2.22 | 39.67 |
| | 校核煤种 2 | 60.25 | 6.69 | 3.87 | 70.81 | 30.13 | 3.35 | 1.94 | 35.42 |
| 2 台炉 | 设计煤种 | 75.34 | 8.38 | 7.76 | 91.48 | 37.67 | 4.19 | 3.88 | 45.74 |
| | 校核煤种 1 | 134.78 | 14.98 | 8.86 | 158.62 | 67.39 | 7.49 | 4.43 | 79.31 |
| | 校核煤种 2 | 120.50 | 13.38 | 7.74 | 141.62 | 60.25 | 6.69 | 3.87 | 70.81 |

注　年利用小时数按 5000h 计，石子煤按耗煤量 1%考虑。

## 二、除渣系统选择

### （一）除渣系统简介

普通煤粉锅炉除渣系统常用的有湿式和干式两种除渣系统。湿式除渣系统是一种利用水冷却锅炉热渣的系统，该系统应用的时间较长，技术成熟，国内外电厂有大量的设计和投运经验；干式除渣系统是一种利用自然空气冷却锅炉热渣的系统，该系统起步稍晚，

但是“十一五”期间在国内得到迅猛的发展，有相当多的设计经验和投运业绩。

1. 湿式除渣系统

对于国内电厂湿式除渣系统，主要归纳为以下3种：

（1）锅炉排渣→水封式排渣槽→碎渣机→水力喷射泵→管道→脱水仓→汽车（或船等）外运。

（2）锅炉排渣→刮板捞渣机→碎渣机→渣沟→渣浆泵→管道→脱水仓→汽车（或船等）外运。

（3）锅炉排渣→刮板捞渣机（或加机械设备中转）→渣仓（加渣水循环系统）→车（或船等）外运。

由于刮板捞渣机直接上渣仓方案系统简单可靠，技术经济性较好，近年来新建电厂湿式除渣系统绝大多数均采用该方案。

与之配套的渣水循环系统一般可分为以下4种：

（1）自动反冲洗过滤器+管（板）式换热器式渣水处理冷却循环系统。

（2）高效浓缩机+机力冷却塔渣水处理冷却循环系统。

（3）渣水自然冷却闭式循环系统。

（4）刮板捞渣机维持水位自平衡的渣水系统。

以上4种渣水循环系统都有大量的应用，而刮板捞渣机维持水位自平衡的渣水系统简单，设备少，同时其投资成本也最省，节能效果显著，故在最近的工程中应用较多。

2. 干式除渣系统

目前国内大、中型机组常见的干式除渣系统根据其配套输送方式的不同可分为2种：

（1）风冷式排渣机+机械输送系统+渣仓。

（2）风冷式排渣机+气力输送系统+渣仓。

目前，由于风冷式排渣机+机械输送系统+渣仓的干式除渣系统方案布置紧凑、系统简单；另外，其投资较少、运行维护量较少，在国内应用最多。

（二）除渣系统的拟定

除渣系统本着技术上采用先进、成熟的系统；经济上投资和运行成本在全寿命期，节能、节水；运行上安全可靠；另外，满足环保要求，利于灰渣综合利用的原则。结合近年来国内大、中型机组排渣系统的设计、运行情况，以及工程煤质、炉型、渣量、结焦性等因素，本期工程除渣系统方案按刮板捞渣机直接上渣仓，渣水维持水位的自平衡方案（简称湿渣自平衡除渣方案）和干式除渣方案进行技术经济比较后，提出推荐方案。

1. 除渣系统工艺流程及方案描述

（1）湿渣自平衡除渣方案（方案一）。该工程除渣系统按捞渣机直接上渣仓方案拟定，系统图参见图7-1。

锅炉炉膛排渣连续进入刮板捞渣机上槽体，经水冷却和粒化后由刮板捞渣机捞出在捞渣机倾斜段脱水后输送至渣仓，由渣仓对湿渣进一步脱水。每炉设1座渣仓，湿渣由刮板捞渣机直接送入渣仓。渣仓设置有析水元件，使湿渣的含水率尽可能地降低，经脱水后的湿渣由自卸汽车送往灰场或综合利用用户；湿渣带走及蒸发水量由循环水补充。

刮板捞渣机的正常用水量由链条冲洗水和导轮轴封水供给，通过设一套渣水监控装置，与水位补水阀自动联锁控制，使捞渣机内辐射蒸发和渣带走的水量平衡，实现无溢流水方式运行。

根据锅炉排渣量，捞渣机正常出力为10t/h，最大出力为60t/h。满足锅炉吹灰时渣量瞬间大增的工况，并能够在捞渣机满载时平稳启动。为防止低负荷时细渣量大，渣浆在刮板侧流，在刮板两侧加挡边。

刮板捞渣机为连续运行。为了保证系统的可靠性，刮板捞渣机关键部件拟考虑进口，如链条、接链环、液压马达等。

渣仓靠近锅炉房布置在刮板捞渣机出口处，为全钢结构，每炉对应的渣仓有效容积为$1\times187m^3$，可储存设计工况下约42h的锅炉排渣量。渣仓直径为8m。运转层布置有气动排渣门，用气由压缩空气母管供给。渣仓顶层布置有起吊用电动葫芦1台。从0m有楼梯通往渣仓运转层和仓顶。

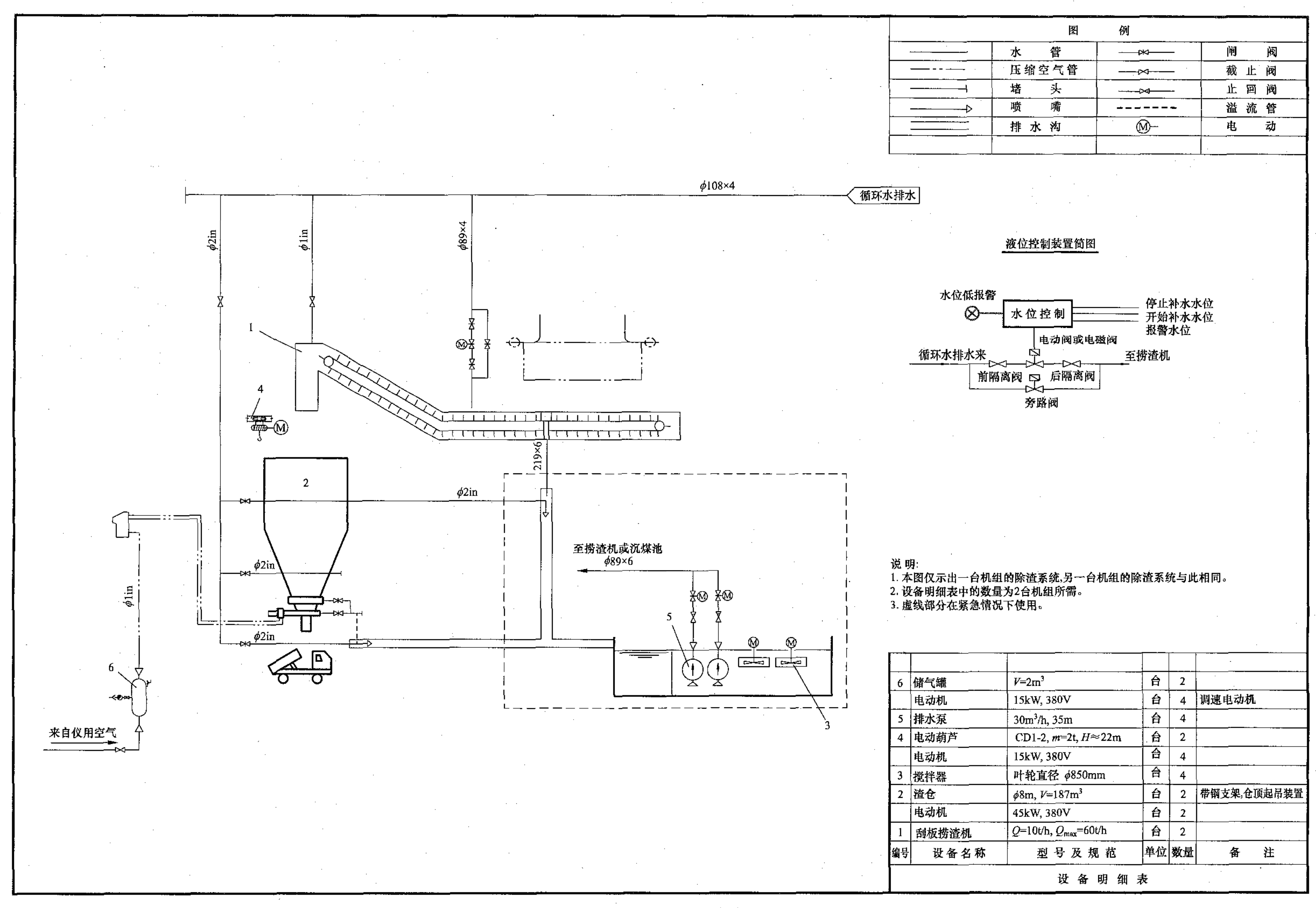
刮板捞渣机紧急情况下溢流水及渣仓的析水均自流进入设置于锅炉房0m的溢流水池。考虑锅炉结大焦时需加大冷却水，此时，允许捞渣机溢流水排入溢流水池，溢流水经出力为$30m^3/h$的排污泵返回捞渣机或送到沉煤池。

捞渣机在锅炉房内设就地电控箱，可就地启、停控制，并通过灰系统控制网络实现在机组控制室对其监视和控制。

（2）干式除渣方案（方案二）。干式除渣系统作为该工程的比较方案，主要由底渣冷却系统、机械输送系统、储渣系统、卸渣系统、仪表及电气控制系统组成。系统参见图7-2。

每台炉底渣输送系统包括一台渣井、一套大渣挤压装置、一套一级钢带机（包括碎渣机）、一套二级钢带机、两台斗式提升机。

渣井通过机械密封直接与锅炉底部密封连接，炉底渣经渣井下落到干式排渣机不锈钢输送钢带上，高温炉渣由不锈钢输送带向外输送，在输送过程中热渣被逆向流动的空气冷却，热渣到二级钢带机头部已经被冷却到100℃以下，最大出力时被冷却至150℃以下；冷却用的空气，在锅炉炉膛负压的作用下，由干式排渣机壳体上开设的可调进风口进入设备内部，冷空气与热渣进行逆向热交换，用于冷却的冷空气升温后进入炉膛。二级钢带机出口设置有事故应急排渣口。




| 编号 | 设备名称 | 型号及规范 | 单位 | 数量 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 6 | 储气罐 | $V$=2m³ | 台 | 2 | |
| | 电动机 | 15kW, 380V | 台 | 4 | 调速电动机 |
| 5 | 排水泵 | 30m³/h, 35m | 台 | 4 | |
| 4 | 电动葫芦 | CD1-2, $m$=2t, $H$≈22m | 台 | 2 | |
| | 电动机 | 15kW, 380V | 台 | 4 | |
| 3 | 搅拌器 | 叶轮直径 φ850mm | 台 | 4 | |
| 2 | 渣仓 | φ8m, $V$=187m³ | 台 | 2 | 带钢支架,仓顶起吊装置 |
| | 电动机 | 45kW, 380V | 台 | 2 | |
| 1 | 刮板捞渣机 | $Q$=10t/h, $Q_{max}$=60t/h | 台 | 2 | |

设备明细表

图7-1 湿渣自平衡除渣系统图

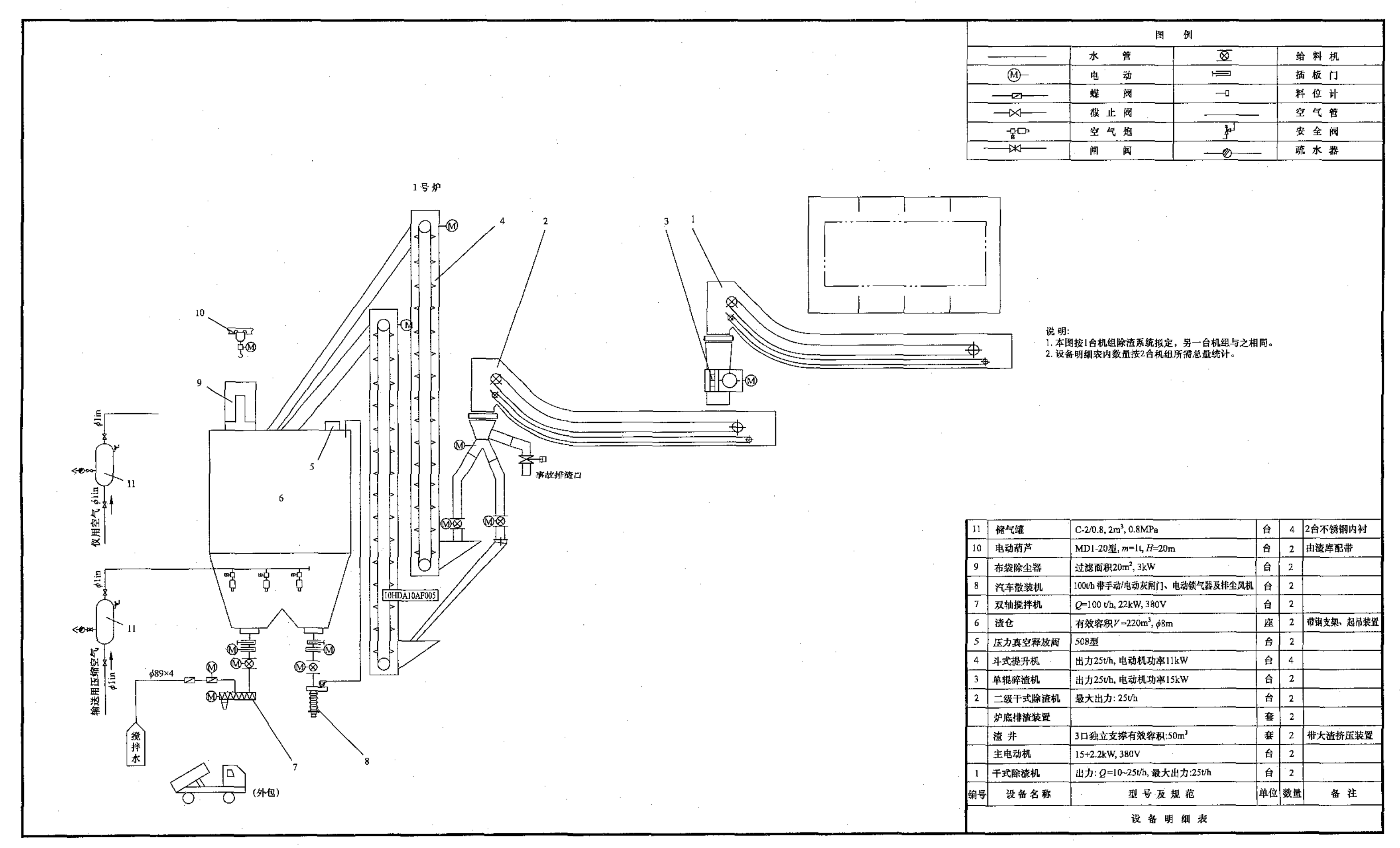



图 例

| 图例 | 名称 | 图例 | 名称 |
|---|---|---|---|
| —— | 水 管 | ⊗ | 给料机 |
| Ⓜ— | 电 动 | | 插板门 |
| | 蝶 阀 | | 料位计 |
| | 截止阀 | —— | 空气管 |
| | 空气炮 | | 安全阀 |
| | 闸 阀 | | 疏水器 |

设备明细表

| 编号 | 设备名称 | 型号及规范 | 单位 | 数量 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 储气罐 | C-2/0.8, 2m$^3$, 0.8MPa | 台 | 4 | 2台不锈钢内衬 |
| 10 | 电动葫芦 | MD1-20型, $m$=1t, $H$=20m | 台 | 2 | 由渣库配带 |
| 9 | 布袋除尘器 | 过滤面积20m$^2$, 3kW | 台 | 2 | |
| 8 | 汽车散装机 | 100t/h 带手动/电动灰闸门、电动锁气器及排尘风机 | 台 | 2 | |
| 7 | 双轴搅拌机 | $Q$=100 t/h, 22kW, 380V | 台 | 2 | |
| 6 | 渣仓 | 有效容积$V$=220m$^3$, $\phi$8m | 座 | 2 | 带钢支架、起吊装置 |
| 5 | 压力真空释放阀 | 508型 | 台 | 2 | |
| 4 | 斗式提升机 | 出力25t/h, 电动机功率11kW | 台 | 4 | |
| 3 | 单辊碎渣机 | 出力25t/h, 电动机功率15kW | 台 | 2 | |
| 2 | 二级干式除渣机 | 最大出力: 25t/h | 台 | 2 | |
| | 炉底排渣装置 | | 套 | 2 | |
| | 渣 井 | 3口独立支撑有效容积:50m$^3$ | 套 | 2 | 带大渣挤压装置 |
| | 主电动机 | 15+2.2kW, 380V | 台 | 2 | |
| 1 | 干式除渣机 | 出力: $Q$=10~25t/h, 最大出力:25t/h | 台 | 2 | |

图7-2 干式除渣系统图

为避免锅炉结大焦时大焦影响干式排渣机的正常运行，在渣井出口设置大焦拦截网和大渣破碎装置，将大渣预破碎至小于300mm的渣进入干式排渣机，大焦拦截网上设有监视器，能监视到拦截网上大焦的情况；同时，在一、二级干式排渣机之间设有破碎设备，该设备能将小于300mm，而碎渣机不易破碎的渣破碎至25mm×25mm以下以利用后续设备运行要求。

炉底渣被碎渣机破碎后，由后续机械系统斗式提升机送至渣仓储存，渣仓的炉渣通过干灰散装机装车或双轴搅拌机调湿后外运至用户或贮灰场。

每台炉底渣系统配1座干渣仓。干式排渣机出力为10～25t/h，碎渣机、斗式提升机出力为25t/h，钢渣仓的有效容积约为220m³，大约能储存一台锅炉BMCR工况下燃烧设计煤种时42h的渣量。

系统由DCS自动控制运行。

（三）除渣系统的比较

1. 技术比较（见表7-4）

表7-4　除渣方案技术对比

| 序号 | 项目 | 湿式自平衡方案 | 干式除渣方案 |
|---|---|---|---|
| 1 | 除渣设备对锅炉排渣结焦的适应性 | 适应性较好 | 适应性比湿渣差，主要表现在渣量变化和出现结焦时渣温和冷却风量不易控制 |
| 2 | 对灰渣结垢的适应性 | 捞渣机溢流水，回水系统和渣仓析水元件易结垢，但系统正常运行不溢流，影响较小 | 因渣与水无接触，无此问题 |
| 3 | 系统特点 | 除渣系统环节少，系统简单 | 除渣环节稍多，系统较简单 |
| 4 | 系统可靠性 | 可靠性较好 | 可靠性较好 |
| 5 | 对锅炉运行效率的影响 | 无影响 | 有影响 |
| 6 | 系统耗水量 | 约4.1m³/h | — |
| 7 | 系统耗电量 | 55kW | 72.7kW |
| 8 | 检修维护费用 | 基本相当 | 基本相当 |
| 9 | 渣的综合利用 | 基本相当 | 基本相当 |
| 10 | 除渣设施占地 | 基本相当 | 基本相当 |
| 11 | 系统设备工作场地环境 | 卫生环境较好 | 卫生环境较好 |
| 12 | 业绩情况 | 多 | 多 |

注　据前期综合利用情况调查，该工程渣的综合利用用途以铺路为主，干渣也是通过加湿后运出，故干渣综合利用无明显优势。

2. 初投资比较（两台炉）（见表7-5）

表7-5　除渣方案初投资对比

| 序号 | 项目 | 湿式自平衡方案（万元） | 干式除渣方案（万元） |
|---|---|---|---|
| 1 | 设备材料费用（包括工艺系统、仪表控制） | 1420 | 1510 |
| 2 | 土建费用 | 60 | 60 |
| 3 | 安装费用 | 30 | 60 |
| 4 | 方案可比总费用 | 1510 | 1630 |
| 5 | 方案费用差 | — | 120 |

3. 年费用比较（两台炉）（见表7-6）

表7-6　除渣方案年费用对比

| 序号 | 比较内容 | 湿式自平衡方案（万元） | 干式除渣方案（万元） |
|---|---|---|---|
| 1 | 年运行水费 | 3.24 | — |
| 2 | 年运行电费 | 9.35 | 12.4 |
| 3 | 年检修维护费用 | 8 | 10 |
| 4 | 年总费用 | 20.59 | 22.4 |
| 5 | 年总费用20年折现 | 217.3 | 236.4 |
| 6 | 差值 | — | 19.1 |

注　1. 检修费用是估算的，根据最近干式除渣系统运行情况，清扫链、钢带等环节维护工作量比湿渣系统稍大。表中数据仅列出方案差异部分，作为方案比较用，不作为技术经济依据。

2. 根据该工程渣的综合利用情况看是以铺路为主，干渣也通过加湿后运出，所以没有进行渣的综合利用费用的比较。

3. 年利用小时数按5000h计，20年折现系数取10.553，电费按0.34元/（kW·h）计，水费约为1.58元/t。

4. 总经济比较（两台炉）（见表7-7）

表7-7　除渣方案总经济比较

| 序号 | 比较内容 | 湿式自平衡方案（万元） | 干式除渣方案（万元） | 差值=自平衡−干式除渣（万元） |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 初投资 | 1510 | 1630 | −120 |
| 2 | 运行维护20年折现 | 217.3 | 236.4 | −19.1 |
| 3 | 合计 | 1727.3 | 1866.4 | −139.1 |

注　本表未考虑采用湿渣方案提高锅炉效率和降低锅炉下联箱标高带来的经济效益。

## 三、除飞灰系统选择

### （一）除飞灰系统的选择

1. 除飞灰系统简介

除飞灰系统是指锅炉及烟气处理系统排除的飞灰集中输送至厂内飞灰储存或转运点，一般可以采用气力、机械、水力输送等系统或几种系统组合的输送方式。

各输送系统的主要特点比较见表7-8。

表7-8　各输送系统的主要特点比较

| 系统类型 | 气力输灰系统 | 机械输灰系统 | 水力输灰系统 |
|---|---|---|---|
| 系统特点 | 系统成熟，自动化程度高，运行人员少 | 系统较成熟，自动化程度较高 | 系统成熟，自动化程度较高 |
| 系统布置 | 布置简单，管道布置较灵活，占地少，对厂区总平面影响小 | 布置复杂，设备一般只能直线布置，占地大，对厂区总平面格局影响大 | 布置较简单，管道布置较灵活，占地较少，对厂区总平面影响小 |
| 检修维护 | 主要是弯头、阀门的磨损，检修维护工作量小 | 主要是设备轴承、链条等的维护，检修维护工作量较大 | 主要是弯头、阀门磨损以及管道及附件的结垢，检修维护工作量一般 |
| 密闭性能 | 完全密闭 | 基本密闭，部分设备如带式输送机未密闭，容易造成扬尘 | 完全密闭 |
| 对环境影响 | 可采用干灰场或粉煤灰综合利用避免对地下水及周围环境污染 | 可采用干灰场避免对地下水及周围环境污染，设备严密性稍差容易造成对环境扬尘 | 采用水灰场对地下水及周围环境污染严重 |
| 对飞灰综合利用的影响 | 不改变飞灰固有活性及物化特性，综合利用好 | 不改变飞灰固有活性及物化特性，综合利用好 | 加水后飞灰活性变化，综合利用受限制。目前根据国家10部委于2013年3月1日颁布实施的19号令《粉煤灰综合利用管理办法》“不得湿排粉煤灰” |
| 最大输送能力（t/h） | 80（单管） | ＞300<br>带式输送机＞1000 | ＞500<br>（按干灰计） |
| 最大输送距离（m） | 2000（单级） | ＜200<br>带式输送机＞5000 | ＞10000 |
| 输送速度（m/s） | 高 | 低 | 较低 |
| 能耗 | 高 | 低 | 较高 |

2. 除飞灰系统的选择

对于除尘器飞灰输送，存在以下特点：①火力发电厂粉煤灰较轻、易飞扬，灰量一般较大。②除尘器排灰斗数量多，要求排灰严密性高、时间短、自动化程度高。③除尘器灰斗区域地处主厂房区，环境要求高，不宜采用就地装车（卸灰装车处理不好对环境影响大）。④主厂房区域内运灰汽车道路条件受限（拐弯半径和占道），汽车运输的污染等。⑤灰库一般在除尘器烟囱后面布置，距离一般为300～400m，输送条件适合于占地小、弯曲多的管道布置（不适合采用多级机械设备搭接的机械系统）。⑥灰库设置在烟囱后，利于装车系统设计（车道设计、对粉尘的控制设计等）。因此气力除灰系统相对机械除灰系统更适合火力发电厂飞灰收集点较分散的情况，密闭性好，布置上更加灵活方便，对总平面格局影响较小。目前绝大多数电厂均采用气力除灰的方式。

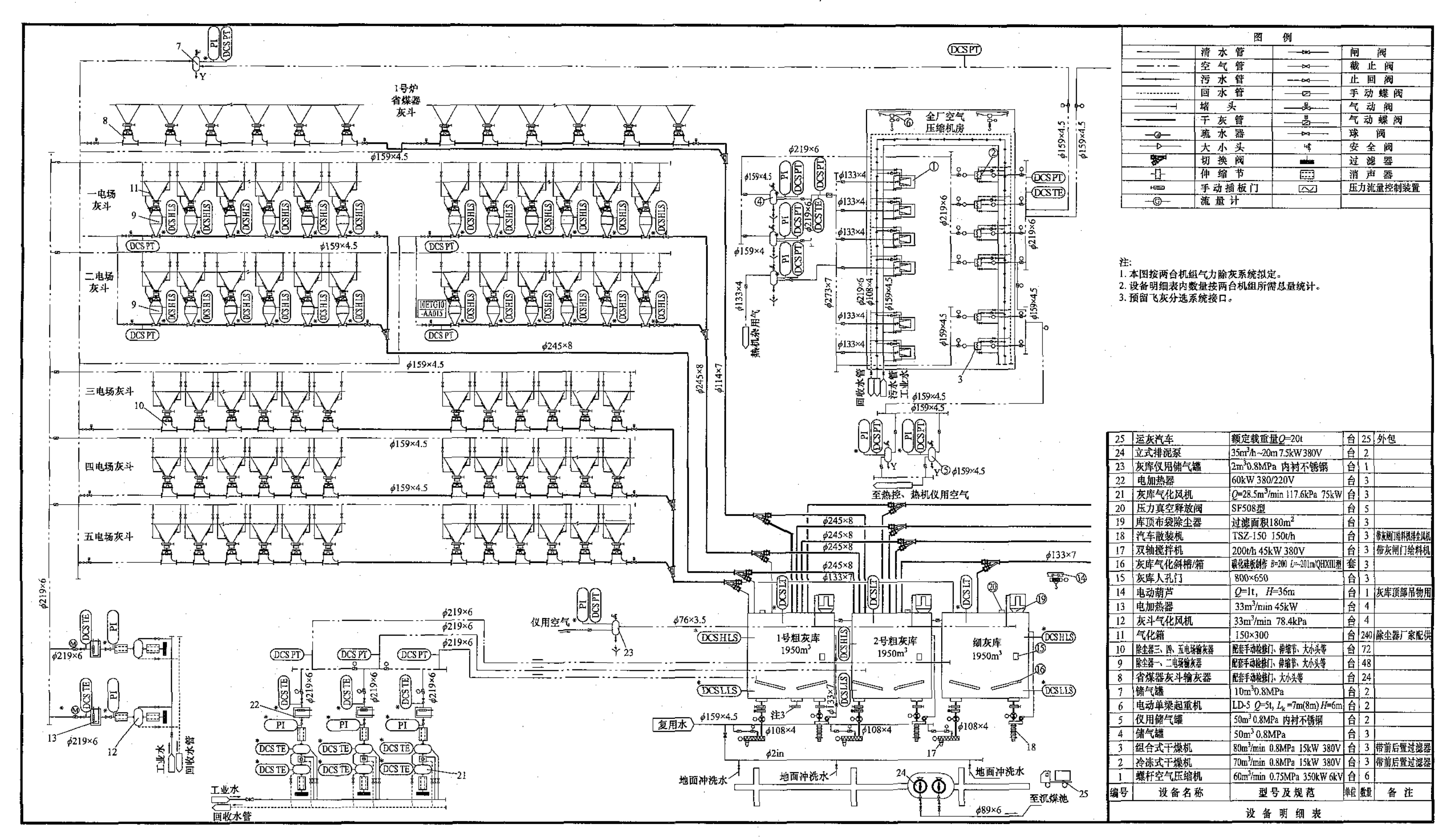
我国经过20世纪90年代浓相输送技术的引进及近年来国内气力输送技术的发展，气力输灰技术已相当成熟，自动化程度高，所需运行人员少，检修维护工作量小，已成为主流的输灰方式，正朝着输送距离更长和耗能更低的方向发展。

飞灰气力集中拟采用正压浓相气力输灰系统。

### （二）除飞灰系统的拟定

1. 除飞灰系统工艺流程及方案描述

每台炉除飞灰系统包括电除尘器和省煤器灰斗排灰的集中输送、储存和处理。除飞灰系统流程参见图7-3。




| 编号 | 设备名称 | 型号及规范 | 单位 | 数量 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 运灰汽车 | 额定载重量$Q$=20t | 台 | 25 | 外包 |
| 24 | 立式排泥泵 | $35m^3/h$~20m 7.5kW 380V | 台 | 2 | |
| 23 | 灰库仪用储气罐 | $2m^3$ 0.8MPa 内衬不锈钢 | 台 | 1 | |
| 22 | 电加热器 | 60kW 380/220V | 台 | 3 | |
| 21 | 灰库气化风机 | $Q=28.5m^3/min$ 117.6kPa 75kW | 台 | 3 | |
| 20 | 压力真空释放阀 | SF508型 | 台 | 5 | |
| 19 | 库顶布袋除尘器 | 过滤面积$180m^2$ | 台 | 3 | |
| 18 | 汽车散装机 | TSZ-150 150t/h | 台 | 3 | 带灰闸门给料机排尘风机 |
| 17 | 双轴搅拌机 | 200t/h 45kW 380V | 台 | 3 | 带灰闸门给料机 |
| 16 | 灰库气化斜槽/箱 | 碳化硅板制作 $B$=200 $L$=~201m/QHXIII型 | 套 | 3 | |
| 15 | 灰库人孔门 | 800×650 | 台 | 3 | |
| 14 | 电动葫芦 | $Q$=1t, $H$=36m | 台 | 1 | 灰库顶部吊物用 |
| 13 | 电加热器 | $33m^3/min$ 45kW | 台 | 4 | |
| 12 | 灰斗气化风机 | $33m^3/min$ 78.4kPa | 台 | 4 | |
| 11 | 气化箱 | 150×300 | 台 | 240 | 除尘器厂家配供 |
| 10 | 除尘器三、四、五电场输灰器 | 配套手动检修门、伸缩节、大小头等 | 台 | 72 | |
| 9 | 除尘器一、二电场输灰器 | 配套手动检修门、伸缩节、大小头等 | 台 | 48 | |
| 8 | 省煤器灰斗输灰器 | 配套手动检修门、大小头等 | 台 | 24 | |
| 7 | 储气罐 | $10m^3$ 0.8MPa | 台 | 2 | |
| 6 | 电动单梁起重机 | LD-5 $Q$=5t, $L_k$=7m(8m) $H$=6m | 台 | 2 | |
| 5 | 仪用储气罐 | $50m^3$ 0.8MPa 内衬不锈钢 | 台 | 2 | |
| 4 | 储气罐 | $50m^3$ 0.8MPa | 台 | 3 | |
| 3 | 组合式干燥机 | $80m^3/min$ 0.8MPa 15kW 380V | 台 | 3 | 带前后置过滤器 |
| 2 | 冷冻式干燥机 | $70m^3/min$ 0.8MPa 15kW 380V | 台 | 3 | 带前后置过滤器 |
| 1 | 螺杆空气压缩机 | $60m^3/min$ 0.75MPa 350kW 6kV | 台 | 6 | |

设备明细表

图7-3　除飞灰系统流程图

气力输灰系统每炉单独设 1 套，2 台炉合用 1 个控制室。该系统设计出力按锅炉燃用校核煤种 1 时 BMCR 工况下飞灰总量的 150%考虑，并要求当一电场事故时，除尘器二电场输送系统出力不小于除尘器一电场实际排灰量，除尘器三电场输送系统出力不小于除尘器二电场实际排灰量，四、五电场以此类推，以保证系统的安全运行。

每炉除尘器飞灰输送系统共设 3 根灰管，其中电除尘器一电场 A 侧的 6 台输送器和二电场 A 侧的 6 台输送器共同出 1 根灰管，管径为 245mm × 8；电除尘器一电场 B 侧的 6 台输送器和二电场 B 侧的 6 台输送器共同出 1 根灰管，管径为 245mm × 8；三、四、五电场合出 1 根灰管，管径为 133mm × 7；最远 1 根灰管的单管长度最长约为 380m。每台炉省煤器灰斗输灰器共出 1 根灰管，管径为 114mm × 7，输送至灰库。

除尘器灰斗流化风每台炉设 2 台灰斗气化风机及电加热器，1 运 1 备。

除灰系统所需输送用气、控制用气均由全厂压缩空气配气中心供给，集中布置，系统集中。为保证设备运行效果，拟定采用水冷型螺杆空气压缩机作为供气设备，根据可靠、经济、合理的原则，选择采用的设备参数：容积流量为 60m$^3$/min，排气压力为 0.75MPa，共设置 6 台，4 运 2 备；其中除灰备用的 1 台兼做杂用用气和仪用检修备用空气压缩机。除灰用压缩空气，拟采用带有前后级过滤器的冷冻式干燥机，储气罐设置在空气压缩机出口；仪用压缩空气，拟采用带有前后级过滤器的吸附式干燥机，储气罐设置在干燥机出口。后处理装置配前后置过滤器，仪用和除灰用选用过滤器精度要求有所不同，备用干燥器过滤器精度按仪用要求配置，对压缩空气进行除油、除水、除杂质处理。

该工程粗细灰分开，本期设 3 座灰库，每炉对应 1 座粗灰库，2 炉对应一座细灰库，预留两套飞灰分选系统的条件。为了保证灰库检修时不影响气力输送系统的正常运行，粗灰管均可在两台炉的粗灰库之间切换，细灰可在细灰库与对应粗灰库之间切换。灰库顶部设有布袋除尘器，输送空气经其除尘后排入大气。灰库底设有由碳化硅板透气层及钢质壳体组成的气化槽，可通入干热空气使库内贮灰气化，便于排出。

工程考虑粉煤灰的综合利用，灰库容积按存储设计煤质时间约 48h 选取，每座粗灰库有效容积约为 1950m$^3$。

灰库按钢筋混凝土结构设计，3 座灰库连为一体，每座灰库直径为 15m，高 25m。灰库 6.0m 为运转层。

每座灰库下均设置有 1 台汽车散装机和 1 台双轴搅拌机。汽车散装机直接将干灰装载至汽车运至综合利用点，双轴搅拌机将飞灰加湿送至灰场。

灰库运转层设 3 台灰库气化风机及电加热器，取消灰库气化风机房。

输灰系统进入 DCS 控制，同时备有手动操作。

螺杆空气压缩机及其配套干燥机均按 DCS 集中控制，也可就地控制。灰库气化风机通过灰系统控制网络实现在机组控制室对其监视和控制。灰库、渣仓卸料装置及真空吸尘装置等就地控制，控制信号接入 DCS。

2. 主要设计参数（见表 7-9）

表 7-9　　主要设计参数

| 序号 | 项目 | | 单位 | 数据 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 机组容量 | | MW | 2 × 1000 |
| 2 | 每台机组灰量（设计/校核 1/校核 2） | | t/h | 37.67/67.39/60.25 |
| 3 | 干灰系统出力（综合出力） | | | 校核煤种 1 灰量的 1.5 倍 |
| 4 | 灰管数量/材质 | | 根 | 每台炉 4 根/直管段无缝钢管，弯头采用内衬陶瓷 |
| 5 | 灰管规格 | 一电场、二电场 | mm | 2 × $\phi$245 × 8 |
| | | 三电场、四电场、五电场 | mm | $\phi$133 × 7 |
| | | 省煤器灰斗 | mm | $\phi$114 × 7 |
| 6 | 两台炉输灰平均耗气量（设计出力时） | | m$^3$/min | 120 |
| 7 | 两台炉仪用平均耗气量（设计出力时） | | m$^3$/min | 73.16 |

## 四、除石子煤系统选择

### （一）石子煤系统的选择

石子煤是指中速磨煤机在运行过程中从下部排出的没有被磨碎的黄铁矿及被夹带的矸石和煤粒，含矸石、铁块、煤粒及其他杂物等。石子煤输送系统可以采用简易机械（密闭方式）、水力输送、机械输送和气力输送方式（见表 7-10）。

表 7-10　　几种石子煤输送方式的比较

| 序号 | 项　目 | 水力输送 | 机械输送 | 气力输送 | 简易机械 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 主要设备 | 水力喷射器、输送管道等 | 埋刮板输送机、带式输送机 | 螺旋提升机、仓泵、输送管道等 | 密封仓、移动石子煤斗、叉车 |
| 2 | 自动化程度 | 较高 | 较高 | 较高 | 一般 |
| 3 | 系统特点 | 环节较多，系统较复杂 | 环节较多，系统较复杂 | 环节较多，系统最复杂 | 环节少，系统简单 |
| 4 | 运行可靠性 | 国产设备故障率较高，可靠性一般。进口设备可靠性较高 | 国产设备故障率较高，可靠性一般。进口设备可靠性较高 | 系统故障率较高，易发生磨损、卡堵等现象 | 完全人工，可靠性靠人力保证，可靠性高 |
| 5 | 系统布置 | 需布置水力喷射器及输送管道，较为复杂 | 需在炉前通道深挖隧道，并布置石子煤仓，最复杂 | 需布置气力输送设备、管道及石子煤仓，较为复杂 | 简单 |
| 6 | 对煤种适应性 | 很强 | 很强 | 较弱 | 很强 |
| 7 | 环保性能 | 系统全封闭，无扬尘，环保性能很好 | 系统全封闭，无扬尘，环保性能很好 | 系统全封闭，无扬尘，环保性能很好 | 石子煤斗密封，扬尘少，环保性能好 |
| 8 | 维护检修工作量 | 较大 | 较大 | 较大 | 较小 |
| 9 | 初投资费用（万元） | 约 380 | 约 300 | 约 350 | 约 50 |
| 10 | 年运行费用（万元） | 约 62 | 约 17 | 约 31 | 约 10 |

注　初投资费用和年运行费用按 2×1000MW 工程估算，仅供参考。

由表 7-10 可知，带密闭装置的简易机械方式操作灵活，系统简单，初投资和运行费用低，维护工作量小。综上所述，该工程石子煤系统采用简易机械方案。

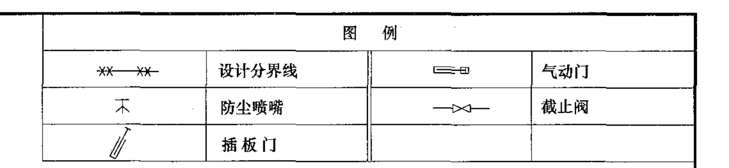
（二）石子煤系统工艺流程及方案描述

该方案系统流程见图 7-4。

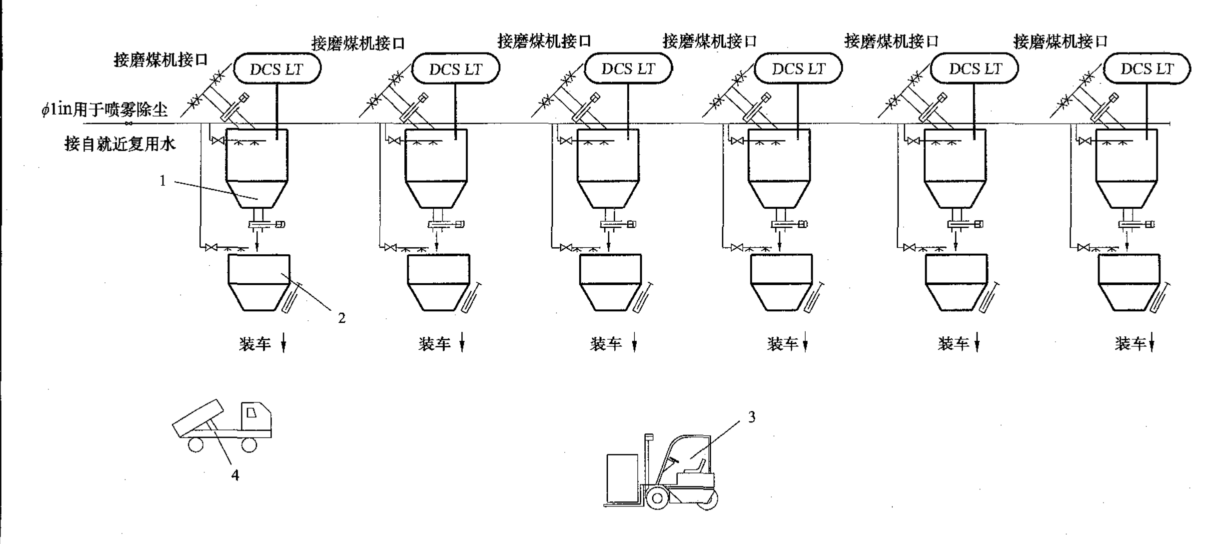
每台炉共设 6 台中速磨煤机，每台磨煤机侧下部有一个石子排渣箱，石子排渣箱通过一个上部气动阀门与磨煤机相连，有一个下部气动阀门为石子煤排出口，排放在活动石子煤小斗中的石子煤由叉车直接运输至汽车车厢上方，通过专用活动石子煤斗排除装置，非常方便地卸至车厢内，由汽车运至灰场。此外，考虑石子煤斗排除时的降尘，在石子煤斗中设少量雾化水喷洒系统（后期在施工图阶段活动石子煤斗改为带密闭装置的石子煤斗）。

本章通过举例说明在设计过程中需根据工程条件进行多方案技术经济比选，选择最优的方案。在选择过程中除了考虑系统本身优点外，还需综合考虑对上下游专业的影响及电厂整体因素，做到综合最优。

本章所列工程已投运，目前整体运行情况良好，各项指标符合设计预期。渣系统总体运行情况良好，未出现捞渣机水温超温等问题，实测主要工况的锅炉效率均略高于设计值；除尘器及省煤器灰系统运行情况良好，系统出力满足工程要求，未发生卡堵及漏灰、漏气现象，其中 1 号炉除灰和脱硫系统总耗气量约为 $64m^3/min$，1 号炉及全厂公用设施仪用气耗气量约为 $38m^3/min$，与设计值吻合。



| 图 | 例 | | |
|---|---|---|---|
| | 设计分界线 | | 气动门 |
| | 防尘喷嘴 | | 截止阀 |
| | 插板门 | | |




说明：本图按1×1000MW 机组的除渣系统拟定，设备明细表按2×1000MW机组所需总量统计。

| 编号 | 名　称 | 型号及规范 | 单位 | 数量 | 备　注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 自卸汽车 | 5t | 台 | 2 | 外包 |
| 3 | 电瓶叉车 | 2t | 台 | 2 | |
| 2 | 活动石子煤斗 | $V$=0.50m$^3$ | 台 | 12 | |
| 1 | 石子煤斗 | $V$=0.50m$^3$ | 台 | 12 | 磨煤机厂配带 |

设备明细表

图7-4　石子煤系统图

# 附　录

## 附录A　锅炉灰渣量计算

### A.1　每台锅炉产生的灰渣量计算

煤粉燃烧锅炉应按下式计算

$$G_{hz}=G_m\left(\frac{A_{ar}}{100}+\frac{Q_{net,ar}q_4}{33\,870\times100}\right) \tag{A-1}$$

循环流化床锅炉应按下式计算

$$G_{hz}=G_m\left(\frac{A_{zs}}{100}+\frac{Q_{net,ar}q_4}{33\,870\times100}\right) \tag{A-2}$$

式中　$G_{hz}$——每台锅炉产生的灰渣量，t/h；

$G_m$——每台锅炉最大连续蒸发量工况的燃煤量，t/h；

$A_{ar}$——燃料收到基灰分，%；

$Q_{net,ar}$——燃料收到基低位发热量，kJ/kg；

$q_4$——锅炉机械未完全燃烧损失，%，由锅炉厂家提供或参照表A-1选取；

$A_{zs}$——循环流化床锅炉入炉物料折算灰分，%。

表A-1　机械未完全燃烧损失（$q_4$）值

| 锅炉形式 | 燃料种类 | $q_4$（%） |
|---|---|---|
| 固态排渣煤粉炉 | 无烟煤 | 4 |
| | 贫煤 | 2 |
| | 烟煤（$V_{daf}$≤25%） | 2 |
| | 烟煤（$V_{daf}$>25%） | 1.5 |
| | 褐煤 | 0.5 |
| | 洗煤（$V_{daf}$≤25%） | 3 |
| | 洗煤（$V_{daf}$>25%） | 2.5 |
| 液态排渣炉 | 烟煤 | 1～1.5 |
| | 无烟煤 | 2～3 |
| 循环流化床炉 | 烟煤 | 2～2.5 |
| | 无烟煤 | 2.5～3.5 |

### A.2　循环流化床锅炉入炉物料折算灰分计算

循环流化床锅炉入炉物料折算灰分应按下式计算

$$A_{zs}=A_{ar}+3.125S_{ar}[m(100/K_{CaCO_3}-0.44)+0.8\eta_s/100] \tag{A-3}$$

式中　$A_{ar}$——燃料收到基灰分，%；

$S_{ar}$——燃料收到基硫分，%；

$m$——Ca/S摩尔比，由锅炉厂提供或按2.0～2.5选取；

$K_{CaCO_3}$——石灰石中$CaCO_3$含量，即石灰石纯度，%；

$\eta_s$——脱硫效率，%，由锅炉厂提供。

### A.3　每台锅炉产生的渣量计算

每台锅炉产生的渣量应按下式计算

$$G_z=G_{hz}\phi_z/100 \tag{A-4}$$

式中　$G_z$——每台锅炉产生的渣量，t/h；

$\phi_z$——锅炉产生的渣占灰渣量的百分比，%，由锅炉厂提供或按表A-2选取。

表A-2　不同类型锅炉的灰渣分配率表

| 锅炉形式 | 固态排渣炉（%） | 液态排渣炉（%） | 循环流化床炉（%） |
|---|---|---|---|
| 渣 | 10～20 | 40～60 | 40～60 |
| 灰 | 90～80 | 60～40 | 60～40 |

注　当设有省煤器灰斗时，其灰量按总灰渣量的3%～5%计算；当设有空气预热器灰斗时，其灰量按总灰渣量的2%～3%计算。

### A.4　每台锅炉产生的灰量计算

每台锅炉产生的灰量应按下式计算

$$G_h=G_{hz}\phi_h/100 \tag{A-5}$$

式中　$G_h$——每台锅炉产生的灰量，t/h；

$\phi_h$——锅炉产生的灰占灰渣量的百分比，%，由锅炉厂提供或按表A-2选取。

### A.5　每台锅炉的省煤器烟道灰斗收集灰量计算

每台锅炉的省煤器烟道灰斗收集灰量应按下式计算

$$G_{hs}=G_{hz}\phi_{hs}/100 \tag{A-6}$$

式中　$G_{hs}$——每台锅炉的省煤器灰量，t/h；

$\phi_{hs}$——锅炉省煤器灰斗收集的灰占灰量的百分比，%，由锅炉厂提供或按表 A-2 选取。

## A.6　每台锅炉的空气预热器烟道灰斗收集灰量计算

每台锅炉的空气预热器烟道灰斗收集灰量应按下式计算

$$G_{hk}=G_{hz}\phi_{hk}/100 \quad (A-7)$$

式中　$G_{hk}$——每台锅炉的空气预热器灰量，t/h；

$\phi_{hk}$——锅炉空气预热器灰斗收集的灰（如有）占灰量的百分比，%，由锅炉厂提供或按表 A-2 选取。

## A.7　每台锅炉的除尘器灰斗收集灰量计算

每台锅炉的除尘器灰斗收集灰量应按下式计算

$$G_{hc}=G_h\eta_c/100 \quad (A-8)$$

式中　$G_{hc}$——每台锅炉的除尘器灰斗收集灰量，t/h；

$\eta_c$——除尘器效率，%。

## A.8　中速磨煤机排出的石子煤量计算

中速磨煤机排出的石子煤量宜按下式计算

$$G_s=G_m\phi_s/100 \quad (A-9)$$

式中　$G_s$——石子煤量，t/h；

$G_m$——锅炉最大连续蒸发量工况的实际燃煤量，t/h；

$\phi_s$——石子煤排出率，%，由锅炉厂提供或按 0.5%～1%。

# 附录B 物料料性测试数据表

| 样品 | 密度（t/m³） | | 粒径（μm） | | 安息角（°） | 摩擦角（°） | | 比表面积（m²/kg） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 堆积 | 真实 | 范围 | 中位径 | | 内摩擦角 | 外摩擦角（钢板） | |
| 煤粉炉灰 | 0.7～0.9 | 2.0～2.2 | 1.2～260 | 13.8～91.0 | 29.56*～35.62* | 39.23* | 23.76* | 80～550 |
| 煤粉炉渣 | 0.8～1.0 | 2.2～2.4 | ≤10.0×10³ | 232～2000 | 34.3* | 38.28* | 26.07* | — |
| 石子煤 | 2.0～2.5 | 3.0～5.0 | ≤8.0×10⁴ | 2500～5000 | 29.06* | — | — | — |
| 循环流化床炉灰 | 0.5～0.9 | 1.8～2.2 | 0.5～150 | 11.39～62.0 | 45.23* | 46.64* | 55.32* | — |
| 循环流化床炉渣 | 1.1～1.3 | 2.2～2.5 | ≤10.0×10³ | 1000～3000 | 26.4* | 44.63* | 29.65* | — |
| 石灰石粉 | 1.1～1.7 | 2.0～2.5 | ≤1.5×10³ | 100～450 | 44.25*～46.52* | 43.6* | 32.7* | — |

注 1. 由于某些项测试数据有限，表中*数值是某少数或个别电厂测试数据，本表仅供初步设计参考，详细设计需做针对性的物料测试。

2. 调湿灰（指干灰加湿排出）的堆积密度可取0.9～1.2t/m³，调湿渣（指干渣加湿搅拌排出）的堆积密度可取1.1～1.3t/m³。

3. 湿渣（指脱水仓、沉渣池、湿渣仓等排出）的堆积密度可取1.3～1.4t/m³。

# 附录C　雷诺数 $Re$ 的计算

雷诺数可按下式计算

$$Re=\frac{Dv}{\nu}$$

式中 $D$——管道内径，m；

$v$——管道流速，m/s；

$\nu$——水的运动黏度，可按表C-1查取，$m^2/s$。

**表C-1**　　**水的运动黏度**

| 温度 $t$（℃） | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 运动黏度 $\nu$（$\times10^{-6}m^2/s$） | 1.306 | 1.139 | 1.003 | 0.893 | 0.80 | 0.726 | 0.658 | 0.601 | 0.553 |

# 附录D 局部阻力系数值（清水）

<table>
<tr><th>名称</th><th>简　图</th><th>局部阻力系数 $\xi$</th><th>计算公式</th></tr>
<tr><td>升降式止回器</td><td></td><td>1.5</td><td rowspan="2">$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td>旋启式止回器</td><td></td><td>
<table>
<tr><td>$d$（mm）</td><td>150</td><td>200</td><td>250</td><td>300</td><td>350</td><td>400</td><td>500</td><td>≥600</td></tr>
<tr><td>$\xi$</td><td>6.5</td><td>5.5</td><td>4.5</td><td>3.5</td><td>3.0</td><td>2.5</td><td>1.8</td><td>1.7</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>闸阀</td><td></td><td>
当全开时（即 $a/d$=0）
<table>
<tr><td>$d$（mm）</td><td>15</td><td>20～50</td><td>80</td><td>100</td><td>150</td><td>200～250</td><td>300～450</td><td>500～800</td><td>900～1000</td></tr>
<tr><td>$\xi$</td><td>1.5</td><td>0.5</td><td>0.4</td><td>0.2</td><td>0.1</td><td>0.08</td><td>0.07</td><td>0.06</td><td>0.05</td></tr>
</table>
当各种开启度时：
<table>
<tr><td>$a/d$</td><td>$\frac{1}{8}$</td><td>$\frac{2}{8}$</td><td>$\frac{3}{8}$</td><td>$\frac{4}{8}$</td><td>$\frac{5}{8}$</td><td>$\frac{6}{8}$</td><td>$\frac{7}{8}$</td></tr>
<tr><td>$\omega_{开启}/\omega_{总}$</td><td>0.948</td><td>0.858</td><td>0.740</td><td>0.609</td><td>0.466</td><td>0.315</td><td>0.159</td></tr>
<tr><td>$\xi$</td><td>0.15</td><td>0.26</td><td>0.81</td><td>2.06</td><td>5.52</td><td>17.0</td><td>97.8</td></tr>
</table>
</td><td>$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td>水泵入口</td><td></td><td>1.0</td><td>$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>名称</th><th>简　图</th><th>局部阻力系数 $\xi$</th><th>计算公式</th></tr>
<tr><td rowspan="2">滤水网</td><td>没有底阀</td><td>2～3</td><td rowspan="2">$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td>有底阀</td><td><table>
<tr><td>$d$（mm）</td><td>40</td><td>50</td><td>75</td><td>100</td><td>150</td><td>200</td><td>250</td><td>300</td><td>350～450</td><td>500～600</td></tr>
<tr><td>$\xi$</td><td>12</td><td>10</td><td>8.5</td><td>7.0</td><td>6.0</td><td>5.2</td><td>4.4</td><td>3.7</td><td>3.6</td><td>3.5</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>套筒伸缩节</td><td>$v_0$</td><td>0.20</td><td>$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">弯管</td><td>90° 弯管<br>$a$　90°　$d$</td><td><table>
<tr><td>$\frac{R}{d}$</td><td>0.5</td><td>1.0</td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>3.0</td><td>4.0</td><td>5.0</td></tr>
<tr><td>$\xi_{90^\circ}$</td><td>1.20</td><td>0.80</td><td>0.60</td><td>0.48</td><td>0.36</td><td>0.30</td><td>0.29</td></tr>
</table></td><td>$h=\xi_{90^\circ}\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td>任意角度的弯管<br>$\alpha$　$d$　$\alpha$</td><td>$\xi_\alpha=a\xi_{90^\circ}$<table>
<tr><td>$\alpha$（°）</td><td>20</td><td>30</td><td>40</td><td>50</td><td>60</td><td>70</td><td>80</td><td>90</td><td>100</td><td>120</td><td>140</td><td>160</td><td>180</td></tr>
<tr><td>$a$</td><td>0.40</td><td>0.55</td><td>0.65</td><td>0.75</td><td>0.83</td><td>0.88</td><td>0.95</td><td>1.00</td><td>1.05</td><td>1.13</td><td>1.20</td><td>1.27</td><td>1.33</td></tr>
</table></td><td>$h=\xi_\alpha\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td>组合弯头</td><td></td><td>$\xi$ 为每个弯头阻力系数的 4 倍</td><td>$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
</table>

续表

| 名称 | 简图 | 局部阻力系数ξ | 计算公式 |
|---|---|---|---|
| 钢制焊接弯管 | 急转弯管；90° 弯管 | 见下表 | $h=\xi\frac{v^2}{2g}$ |
| 钢制焊接弯管 | 乙字管；15°弯头；90°弯头 | 见下表 | $h=\xi\frac{v^2}{2g}$ |

急转弯管

| α(°) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.55 | 0.70 | 0.90 | 1.10 |

90° 弯管

| a/d | 0.710 | 0.943 | 1.174 | 1.420 | 1.500 | 1.850 | 2.560 | 3.140 | 3.720 | 4.890 | 5.596 | 6.280 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ | 0.51 | 0.42 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.39 | 0.43 | 0.43 | 0.45 | 0.46 | 0.44 | 0.44 |

乙字管

| a/d (mm) | 1.23 | 1.67 | 2.37 | 3.77 |
|---|---|---|---|---|
| ξ | 0.30 | 0.32 | 0.26 | 0.24 |

15°弯头

| d (mm) | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ | 0.26 | 0.32 | 0.33 | 0.30 | 0.36 | 0.44 | 0.39 | 0.45 | 0.45 | 0.51 | 0.48 | 0.51 | 0.51 | 0.53 | 0.54 | 0.54 |

90°弯头

| d(mm) | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ | 0.51 | 0.63 | 0.65 | 0.72 | 0.72 | 0.87 | 0.78 | 0.89 | 0.90 | 1.01 | 0.96 | 1.01 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.08 |

续表

<table>
<tr><th>名称</th><th>简 图</th><th>局部阻力系数 $\xi$</th><th>计算公式</th></tr>
<tr><td>钢制焊接弯管</td><td>任意转角焊接弯管</td><td>$\xi=K\xi_{90^\circ}$<br>$\xi_{90^\circ}$为90° 弯管（4 片）阻力系数<br>$K$ 值<br><table><tr><td>$\varphi$</td><td>15°</td><td>30°</td><td>45°</td><td>60°</td></tr><tr><td>$K$</td><td>0.32</td><td>0.55</td><td>0.70</td><td>0.82</td></tr></table></td><td>$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td rowspan="5">各种分支管道</td><td></td><td>流向 $a\rightarrow c$ 0.15<br>流向 $c\rightarrow a$ 0.05</td><td rowspan="5">$h=\xi\frac{v^2}{2g}$</td></tr>
<tr><td></td><td>流向 $a\rightarrow b$，$a\rightarrow c$ 1.0</td></tr>
<tr><td></td><td>流向 $b\rightarrow a$，$c\rightarrow a$ 1.5</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td><table><tr><td>$\alpha$(°)</td><td>30</td><td>45</td><td>60</td></tr><tr><td>$\xi$</td><td>0.3</td><td>0.36</td><td>0.44</td></tr></table> 流向 $a\rightarrow c$</td></tr>
<tr><td><table><tr><td>$\alpha$(°)</td><td>30</td><td>45</td><td>60</td></tr><tr><td>$\xi$</td><td>0.8</td><td>1.0</td><td>1.3</td></tr></table> 流向 $b\rightarrow c$</td></tr>
</table>

续表

| 名称 | 简图 | 局部阻力系数$\xi$ | 计算公式 |
| --- | --- | --- | --- |

**各种分支管道**

流向 $a \to b$

| $v_b / v_a$ | | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $\alpha$(°) | 30 | 0.46 | 0.31 | 0.25 | 0.27 | 0.36 | 0.70 | 0.80 |
| | 45 | 0.60 | 0.50 | 0.51 | 0.58 | 0.74 | 0.98 | 1.30 |
| | 60 | 0.76 | 0.65 | 0.80 | 1.00 | 1.23 | 1.54 | 1.98 |
| | 90 | 1.16 | 1.35 | 1.64 | 2.00 | 2.44 | 2.96 | 3.54 |

流向 $a \to c$

| $v_c / v_a$ | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $\alpha$为 30°～90° | 0.32 | 0.26 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.06 | 0.02 |

计算公式：$h=\xi \frac{v^2}{2g}$

**大小头**

| $\alpha$(°) | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $\xi$ | 0.1 | 0.09 | 0.11 | 0.12 | 0.15 | 0.17 |
| $\alpha$(°) | 20 | 24 | 30 | 40 | 60 | 90 |
| $\xi$ | 0.21 | 0.27 | 0.36 | 0.48 | 0.66 | 0.63 |

0.21

计算公式：$h=\xi \frac{v^2}{2g}$

# 附录E　局部阻力系数值（空气）

| 序号 | 名　称 | | 图　例 | 局部阻力系数ζ | 公称直径 DN（mm） $R_a$=0.2mm 时的局部阻力当量长度 $L_d$（m） | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 1 | 闸阀 | | | 0.3～0.5 | 0.12～0.19 | 0.17～0.29 | 0.24～0.39 | 0.34～0.57 | 0.41～0.68 | 0.53～0.88 | 0.74～1.24 | 0.98～1.63 | 1.28～2.14 | 1.68～2.81 | 2.13～3.55 | 3.18～5.31 | 4.17～6.95 | 5.24～8.73 |
| 2 | 截止阀 | | | 4～9 | 1.53～3.45 | 2.29～5.15 | 3.15～7.08 | 4.55～10.25 | 5.45～12.26 | 7.04～15.85 | 9.89～22.24 | 13.06～29.40 | 17.09～38.46 | 22.44～50.50 | 28.44～63.98 | 42.46～95.54 | 55.57～125.03 | 69.83～157.12 |
| 3 | 旋启式止回阀 | | | 1.3～2.5 | 0.50～0.96 | 0.74～1.43 | 1.02～1.97 | 1.48～2.85 | 1.77～3.41 | 2.29～4.40 | 3.21～6.18 | 4.25～8.17 | 5.56～10.68 | 7.29～14.03 | 9.24～17.77 | 13.80～26.54 | 18.06～34.73 | 22.69～43.64 |
| 4 | 光滑方形补偿器 | | | 1.7 | 0.65 | 0.97 | 1.34 | 1.94 | 2.32 | 2.99 | 4.20 | 5.55 | 7.26 | 9.54 | 12.09 | 18.05 | 23.62 | 29.68 |
| 5 | 90°光滑弯管 | $R=2d$ | | 0.7 | 0.27 | 0.40 | 0.55 | 0.80 | 0.95 | 1.23 | 1.73 | 2.29 | 2.99 | 3.93 | 4.98 | 7.43 | 9.72 | 12.22 |
| | | $R=3d$ | | 0.5 | 0.19 | 0.25 | 0.39 | 0.57 | 0.68 | 0.88 | 1.24 | 1.63 | 2.14 | 2.81 | 3.55 | 5.31 | 6.95 | 8.73 |
| | | $R=4d$ | | 0.3 | 0.12 | 0.17 | 0.24 | 0.34 | 0.41 | 0.53 | 0.74 | 0.98 | 1.28 | 1.68 | 2.13 | 3.18 | 4.17 | 5.24 |
| 6 | 90°焊接弯头 | 一缝 | | 1.3 | 0.50 | 0.74 | 1.02 | 1.48 | 1.77 | 2.29 | 3.21 | 4.25 | 5.56 | 7.29 | 9.24 | 13.80 | 18.06 | 22.69 |
| | | 二缝 | | 0.7 | 0.27 | 0.40 | 0.55 | 0.80 | 0.95 | 1.23 | 1.73 | 2.29 | 2.99 | 3.93 | 4.98 | 7.43 | 9.72 | 12.22 |
| | | 三缝 | | 0.5 | 0.19 | 0.25 | 0.39 | 0.57 | 0.68 | 0.88 | 1.24 | 1.63 | 2.14 | 2.81 | 3.55 | 5.31 | 6.95 | 8.73 |
| 7 | 60°焊接弯头 | | | 0.7 | 0.27 | 0.40 | 0.55 | 0.80 | 0.95 | 1.23 | 1.73 | 2.29 | 2.99 | 3.93 | 4.98 | 7.43 | 9.72 | 12.22 |
| 8 | 45°焊接弯头 | | | 0.3 | 0.12 | 0.17 | 0.24 | 0.34 | 0.41 | 0.53 | 0.74 | 0.98 | 1.28 | 1.68 | 2.13 | 3.18 | 4.17 | 5.24 |
| 9 | 30°焊接弯头 | | | 0.2 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.23 | 0.27 | 0.35 | 0.49 | 0.65 | 0.85 | 1.12 | 1.42 | 2.12 | 2.78 | 3.49 |

续表

| 序号 | 名称 | | 图例 | 局部阻力系数ζ | 公称直径 DN（mm） | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $R_a$=0.2mm 时的局部阻力当量长度 $L_d$（m） | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 10 | 三通 | | | 1.0 | 0.38 | 0.57 | 0.79 | 1.14 | 1.36 | 1.76 | 2.47 | 3.27 | 4.27 | 5.61 | 7.11 | 10.62 | 13.89 | 17.46 |
| | | | | 1.5 | 0.57 | 0.86 | 1.18 | 1.71 | 2.04 | 2.64 | 3.71 | 4.90 | 6.41 | 8.42 | 10.66 | 15.92 | 20.84 | 26.19 |
| | | | | 1.5 | 0.57 | 0.86 | 1.18 | 1.71 | 2.04 | 2.64 | 3.71 | 4.90 | 6.41 | 8.42 | 10.66 | 15.92 | 20.84 | 26.19 |
| | | | | 2.0 | 0.77 | 1.15 | 1.57 | 2.28 | 2.72 | 3.52 | 4.94 | 6.53 | 8.55 | 11.22 | 14.22 | 21.23 | 27.78 | 34.92 |
| | | | | 2.0 | 0.77 | 1.15 | 1.57 | 2.28 | 2.72 | 3.52 | 4.94 | 6.53 | 8.55 | 11.22 | 14.22 | 21.23 | 27.78 | 34.92 |
| | | | | 3.0 | 1.15 | 1.72 | 2.36 | 3.42 | 4.09 | 5.28 | 7.41 | 9.80 | 12.82 | 16.83 | 21.33 | 31.85 | 41.66 | 52.37 |
| 11 | 异径管（由大到小）（括号内为渐缩异径管） | $d_1/d_2$=1.5 | | 0.3<br>（0.1） | 0.12<br>（0.04） | 0.17<br>（0.06） | 0.24<br>（0.08） | 0.34<br>（0.11） | 0.41<br>（0.14） | 0.53<br>（0.18） | 0.74<br>（0.25） | 0.98<br>（0.33） | 1.28<br>（0.43） | 1.68<br>（0.56） | 2.13<br>（0.71） | 3.18<br>（1.06） | 4.17<br>（1.39） | 5.24<br>（1.75） |
| | | $d_1/d_2$=2 | | 0.4<br>（0.3） | 0.15<br>（0.12） | 0.23<br>（0.17） | 0.31<br>（0.24） | 0.46<br>（0.34） | 0.54<br>（0.41） | 0.70<br>（0.53） | 0.99<br>（0.74） | 1.31<br>（0.98） | 1.71<br>（1.28） | 2.24<br>（1.68） | 2.84<br>（2.13） | 4.25<br>（3.18） | 5.56<br>（4.17） | 0.98<br>（5.24） |
| | | $d_1/d_2$=3 | | 0.5 | 0.19 | 0.25 | 0.39 | 0.57 | 0.68 | 0.88 | 1.24 | 1.63 | 2.14 | 2.81 | 3.55 | 5.31 | 6.95 | 8.73 |
| 12 | 异径管（由小到大） | $d_1/d_2$=1.5 | | 0.3 | 0.12 | 0.17 | 0.24 | 0.34 | 0.41 | 0.53 | 0.74 | 0.98 | 1.28 | 1.68 | 2.13 | 3.18 | 4.17 | 5.24 |
| | | $d_1/d_2$=2 | | 0.6 | 0.23 | 0.34 | 0.47 | 0.68 | 0.82 | 1.06 | 1.48 | 1.96 | 2.56 | 3.37 | 4.27 | 6.37 | 8.34 | 10.47 |
| | | $d_1/d_2$=3 | | 0.8 | 0.31 | 0.46 | 0.63 | 0.91 | 1.09 | 1.41 | 1.98 | 2.61 | 3.42 | 4.49 | 5.69 | 8.49 | 11.11 | 13.97 |

# 附录F　螺杆空气压缩机能效等级表

| 驱动电动机输入额定功率（kW） | 能效等级 | 额定排气压力（MPa） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.7 | | 0.8 | | 1.0 | | 1.25 | |
| | | 机组输入比功率［kW/（$m^3$/min）］ | | | | | | | |
| | | 水冷 | 风冷 | 水冷 | 风冷 | 水冷 | 风冷 | 水冷 | 风冷 |
| 110 | 1 | 5.6 | 6.0 | 6.0 | 6.3 | 7.2 | 7.4 | 8.1 | 8.4 |
| | 2 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 7.1 | 8.1 | 8.3 | 9.1 | 9.4 |
| | 3 | 7.2 | 7.6 | 7.6 | 8.1 | 9.1 | 9.6 | 10.1 | 10.7 |
| | T | 7.1 | 7.5 | 7.5 | 8.0 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 10.6 |
| 132 | 1 | 5.6 | 6.0 | 6.0 | 6.3 | 7.2 | 7.4 | 8.1 | 8.4 |
| | 2 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 7.1 | 8.1 | 8.3 | 9.1 | 9.4 |
| | 3 | 7.2 | 7.6 | 7.6 | 8.1 | 9.1 | 9.6 | 10.1 | 10.7 |
| | T | 7.1 | 7.5 | 7.5 | 8.0 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 10.6 |
| 160 | 1 | 5.6 | 6.0 | 6.0 | 6.3 | 7.2 | 7.4 | 8.1 | 8.4 |
| | 2 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 7.1 | 8.1 | 8.3 | 9.1 | 9.4 |
| | 3 | 7.2 | 7.6 | 7.6 | 8.1 | 9.1 | 9.6 | 10.1 | 10.7 |
| | T | 7.1 | 7.5 | 7.5 | 8.0 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 10.6 |
| 200 | 1 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 6.9 | 7.0 | 7.2 | 7.8 | 8.2 |
| | 2 | 6.0 | 6.2 | 6.4 | 6.6 | 7.9 | 8.1 | 8.8 | 9.2 |
| | 3 | 6.8 | 7.2 | 7.5 | 7.9 | 8.9 | 9.4 | 9.8 | 10.5 |
| | T | 6.7 | 7.1 | 7.4 | 7.8 | 8.8 | 9.3 | 9.7 | 10.4 |
| 250 | 1 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.9 | 7.0 | 7.2 | 7.8 | 8.2 |
| | 2 | 6.0 | 6.2 | 6.4 | 6.6 | 7.9 | 8.1 | 8.8 | 9.2 |
| | 3 | 6.8 | 7.2 | 7.5 | 7.9 | 8.9 | 9.4 | 9.8 | 10.5 |
| | T | 6.7 | 7.1 | 7.4 | 7.8 | 8.8 | 9.3 | 9.7 | 10.4 |
| 315 | 1 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.9 | 7.0 | 7.2 | 7.8 | 8.2 |
| | 2 | 6.0 | 6.2 | 6.4 | 6.6 | 7.9 | 8.1 | 8.8 | 9.2 |
| | 3 | 6.8 | 7.2 | 7.5 | 7.9 | 8.9 | 9.4 | 9.8 | 10.5 |
| | T | 6.7 | 7.1 | 7.4 | 7.8 | 8.8 | 9.3 | 9.7 | 10.4 |
| 355 | 1 | 5.2 | | 5.4 | | 6.7 | | 7.4 | |
| | 2 | 5.8 | | 6.1 | | 7.5 | | 8.3 | |
| | 3 | 6.4 | | 7.1 | | 8.5 | | 9.4 | |
| | T | 6.3 | | 7.0 | | 8.4 | | 9.3 | |
| 400 | 1 | 5.2 | | 5.4 | | 6.7 | | 7.4 | |
| | 2 | 5.8 | — | 6.1 | | 7.5 | — | 8.3 | — |
| | 3 | 6.4 | | 7.1 | | 8.5 | | 9.4 | |
| | T | 6.3 | | 7.0 | | 8.4 | | 9.3 | |
| 450 | 1 | 5.2 | | 5.4 | | 6.7 | | 7.4 | |
| | 2 | 5.8 | | 6.1 | | 7.5 | | 8.3 | |
| | 3 | 6.4 | | 7.1 | | 8.5 | | 9.4 | |
| | T | 6.3 | | 7.0 | | 8.4 | | 9.3 | |

# 附录G 压缩空气在不同露点温度与压力下对应的空气饱和含湿量

| 露点温度（℃） | 0.5MPa（g） | 0.6MPa（g） | 0.7MPa（g） | 0.8MPa（g） |
|---|---|---|---|---|
| | 空气饱和含湿量（g/kg） | | | |
| −60 | 1.12E-03 | 9.60E-04 | 8.40E-04 | 7.46E-04 |
| −50 | 0.00408 | 0.00350 | 0.00306 | 0.00272 |
| −40 | 0.0133 | 0.0114 | 0.0100 | 0.0089 |
| −35 | 0.0231 | 0.0198 | 0.0174 | 0.0154 |
| −30 | 0.039 | 0.034 | 0.030 | 0.026 |
| −29 | 0.044 | 0.037 | 0.033 | 0.029 |
| −28 | 0.048 | 0.041 | 0.036 | 0.032 |
| −27 | 0.054 | 0.046 | 0.040 | 0.036 |
| −26 | 0.059 | 0.051 | 0.044 | 0.040 |
| −25 | 0.066 | 0.056 | 0.049 | 0.044 |
| −24 | 0.072 | 0.062 | 0.054 | 0.048 |
| −23 | 0.080 | 0.069 | 0.060 | 0.053 |
| −22 | 0.088 | 0.076 | 0.066 | 0.059 |
| −21 | 0.097 | 0.083 | 0.073 | 0.065 |
| −20 | 0.107 | 0.092 | 0.080 | 0.071 |
| −19 | 0.118 | 0.101 | 0.088 | 0.078 |
| −18 | 0.129 | 0.111 | 0.097 | 0.086 |
| −17 | 0.142 | 0.122 | 0.107 | 0.095 |
| −16 | 0.156 | 0.134 | 0.117 | 0.104 |
| −15 | 0.171 | 0.147 | 0.128 | 0.114 |
| −14 | 0.188 | 0.161 | 0.141 | 0.125 |
| −13 | 0.206 | 0.176 | 0.154 | 0.137 |
| −12 | 0.225 | 0.193 | 0.169 | 0.150 |
| −11 | 0.246 | 0.211 | 0.185 | 0.164 |
| −10 | 0.269 | 0.231 | 0.202 | 0.180 |
| −9 | 0.294 | 0.252 | 0.221 | 0.196 |
| −8 | 0.312 | 0.267 | 0.234 | 0.208 |
| −7 | 0.350 | 0.300 | 0.263 | 0.234 |
| −6 | 0.376 | 0.322 | 0.282 | 0.251 |
| −5 | 0.417 | 0.357 | 0.312 | 0.278 |
| −4 | 0.454 | 0.389 | 0.340 | 0.302 |
| −3 | 0.494 | 0.423 | 0.370 | 0.329 |
| −2 | 0.537 | 0.460 | 0.402 | 0.358 |
| −1 | 0.583 | 0.500 | 0.437 | 0.389 |
| 0 | 0.634 | 0.543 | 0.475 | 0.422 |

续表

| 露点温度（℃） | 0.5MPa（g） | 0.6MPa（g） | 0.7MPa（g） | 0.8MPa（g） |
|---|---|---|---|---|
| | 空气饱和含湿量（g/kg） | | | |
| 1 | 0.682 | 0.585 | 0.511 | 0.455 |
| 2 | 0.727 | 0.623 | 0.545 | 0.484 |
| 3 | 0.787 | 0.674 | 0.590 | 0.524 |
| 4 | 0.845 | 0.724 | 0.633 | 0.563 |
| 5 | 0.906 | 0.776 | 0.679 | 0.604 |
| 6 | 0.971 | 0.832 | 0.728 | 0.647 |
| 7 | 1.040 | 0.892 | 0.780 | 0.693 |
| 8 | 1.114 | 0.955 | 0.835 | 0.742 |
| 9 | 1.192 | 1.022 | 0.894 | 0.794 |
| 10 | 1.276 | 1.093 | 0.956 | 0.850 |
| 11 | 1.364 | 1.169 | 1.023 | 0.909 |
| 12 | 1.458 | 1.249 | 1.093 | 0.971 |
| 13 | 1.557 | 1.334 | 1.167 | 1.037 |
| 14 | 1.662 | 1.424 | 1.246 | 1.107 |
| 15 | 1.774 | 1.520 | 1.329 | 1.181 |
| 16 | 1.891 | 1.621 | 1.417 | 1.260 |
| 17 | 2.016 | 1.727 | 1.510 | 1.342 |
| 18 | 2.147 | 1.839 | 1.609 | 1.430 |
| 19 | 2.287 | 1.959 | 1.714 | 1.523 |
| 20 | 2.434 | 2.085 | 1.824 | 1.621 |
| 21 | 2.590 | 2.219 | 1.940 | 1.724 |
| 22 | 2.754 | 2.359 | 2.063 | 1.833 |
| 23 | 2.927 | 2.507 | 2.192 | 1.948 |
| 24 | 3.110 | 2.664 | 2.330 | 2.070 |
| 25 | 3.303 | 2.829 | 2.474 | 2.198 |
| 26 | 3.506 | 3.003 | 2.626 | 2.333 |
| 27 | 3.720 | 3.186 | 2.786 | 2.475 |
| 28 | 3.946 | 3.379 | 2.954 | 2.625 |
| 29 | 4.183 | 3.582 | 3.132 | 2.782 |
| 30 | 4.433 | 3.796 | 3.319 | 2.948 |
| 31 | 4.695 | 4.020 | 3.515 | 3.122 |
| 32 | 4.972 | 4.257 | 3.721 | 3.306 |
| 33 | 5.263 | 4.505 | 3.939 | 3.499 |
| 34 | 5.568 | 4.766 | 4.166 | 3.701 |
| 35 | 5.889 | 5.041 | 4.406 | 3.913 |
| 36 | 6.225 | 5.328 | 4.657 | 4.136 |
| 37 | 6.579 | 5.631 | 4.921 | 4.371 |
| 38 | 6.950 | 5.948 | 5.198 | 4.616 |

续表

| 露点温度（℃） | 0.5MPa（g） | 0.6MPa（g） | 0.7MPa（g） | 0.8MPa（g） |
|---|---|---|---|---|
| | 空气饱和含湿量（g/kg） | | | |
| 39 | 7.339 | 6.280 | 5.488 | 4.874 |
| 40 | 7.747 | 6.628 | 5.792 | 5.143 |
| 41 | 8.175 | 6.994 | 6.112 | 5.427 |
| 42 | 8.624 | 7.377 | 6.445 | 5.723 |
| 43 | 9.308 | 7.961 | 6.955 | 6.174 |
| 44 | 9.587 | 8.200 | 7.163 | 6.359 |
| 45 | 10.103 | 8.640 | 7.547 | 6.699 |
| 46 | 10.639 | 9.097 | 7.945 | 7.052 |
| 48 | 11.799 | 10.086 | 8.808 | 7.817 |
| 50 | 13.061 | 11.162 | 9.745 | 8.647 |
| 51 | 13.743 | 11.742 | 10.250 | 9.095 |
| 52 | 14.447 | 12.342 | 10.773 | 9.558 |
| 53 | 15.186 | 12.972 | 11.321 | 10.042 |
| 54 | 15.960 | 13.630 | 11.893 | 10.550 |
| 55 | 16.768 | 14.317 | 12.492 | 11.079 |

# 附录H 螺杆空气压缩机站仪表配置

| 序号 | 测量仪表 | 位置 | 装设程度要求 |
|---|---|---|---|
| 一、温度 | | | |
| 1 | 空气压缩机各级排气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 2 | 空气压缩机各级进气温度表 | 设备内部 | 宜 |
| 3 | 空气压缩机润滑油冷却器出油温度表 | 设备内部 | 宜 |
| 4 | 空气压缩机轴承温度表 | 设备内部 | 宜 |
| 5 | 冷却水进水总管水温表 | 管网 | 应 |
| 6 | 空气压缩机机组出水温度表 | 管网 | 应 |
| 7 | 后冷却器出水温度表 | 设备内部 | 应 |
| 8 | 空气压缩机驱动电动机定子绕组温度表 | 设备内部 | 宜 |
| 9 | 机器间环境温度表 | 空气压缩机站内 | 宜 |
| 二、压力 | | | |
| 1 | 压缩机空气站供气母管压力表 | 管网 | 应 |
| 2 | 空气压缩机各级排气口压力表 | 设备内部 | 应 |
| 3 | 空气压缩机组冷却水进水（阀后）压力表 | 管网 | 应 |
| 4 | 润滑油压力（近润滑点）或油过滤器压差表 | 设备内部 | 应 |
| 三、流量 | | | |
| 1 | 空气压缩机组出口流量表 | 管网 | 宜 |
| 2 | 压缩机空气站供气母管流量表 | 管网 | 应 |

# 附录I 离心空气压缩机站仪表配置

| 序号 | 测 量 仪 表 | 位 置 | 装设程度要求 |
|---|---|---|---|
| 一、温度 | | | |
| 1 | 空气压缩机各级排气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 2 | 空气压缩机各级进气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 3 | 空气压缩机机组各级冷却器排气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 4 | 冷却水进水总管水温表 | 管网 | 应 |
| 5 | 空气压缩机机组各级冷却器排水温度表 | 设备内部 | 应 |
| 6 | 空气压缩机机组润滑油冷却器排水温度表 | 设备内部 | 应 |
| 7 | 空气压缩机机组润滑油冷却器出油温度表 | 设备内部 | 应 |
| 8 | 空气压缩机及驱动电动机轴承润滑油油温表 | 设备内部 | 应 |
| 9 | 空气压缩机及驱动电动机轴承温度表 | 设备内部 | 应 |
| 10 | 空气压缩机增速箱轴承温度表 | 设备内部 | 应 |
| 11 | 空气压缩机驱动电动机定子绕组温度表 | 设备内部 | 应 |
| 二、压力 | | | |
| 1 | 压缩空气站供气母管压力表 | 管网 | 应 |
| 2 | 空气压缩机各级进气压力表 | 设备内部 | 宜 |
| 3 | 空气压缩机各级排气压力表 | 设备内部 | 应 |
| 4 | 空气压缩机组后冷却器出口气压表 | 设备内部 | 可 |
| 5 | 空气压缩机组冷却水进水（阀后）压力表 | 管网 | 应 |
| 6 | 空气压缩机组润滑油泵出口母管油压表 | 设备内部 | 应 |
| 7 | 空气压缩机组轴承节流孔前润滑油压力表 | 设备内部 | 应 |
| 8 | 空气压缩机组控制油压力表 | 设备内部 | 应 |
| 9 | 空气压缩机组润滑油过滤器压差表 | 设备内部 | 应 |
| 三、流量 | | | |
| 1 | 空气压缩机组出口流量表 | 管网 | 应 |
| 2 | 压缩机空气站供气母管流量表 | 管网 | 应 |
| 四、液位 | | | |
| 1 | 空气压缩机组润滑油箱油位表 | 设备内部 | 应 |
| 五、机械量 | | | |
| 1 | 空气压缩机轴振动测量表 | 设备内部 | 应 |
| 2 | 空气压缩机轴位移测量表 | 设备内部 | 应 |

# 附录J 空气干燥装置测量仪表配置

| 序号 | 测 量 仪 表 | 位 置 | 装设程度要求 |
| --- | --- | --- | --- |
| 一、温度 | | | |
| 1 | 冷却水进水总管水温表 | 管网 | 应 |
| 2 | 空气干燥装置进气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 3 | 空气干燥器装置排气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 4 | 加热再生吸附式空气干燥装置加热器出口温度表 | 设备内部 | 应 |
| 5 | 加热再生吸附式空气干燥装置再生气进气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 6 | 加热再生吸附式空气干燥装置再生气排气温度表 | 设备内部 | 应 |
| 7 | 冷冻空气干燥器装置蒸发温度表 | 设备内部 | 应 |
| 二、压力 | | | |
| 1 | 空气干燥装置压差表 | 设备内部 | 应 |
| 2 | 空气过滤器压差表 | 设备内部 | 应 |
| 三、流量 | | | |
| 1 | 压缩机空气站供气母管流量表 | 管网 | 应 |
| 四、电气仪表 | | | |
| 1 | 压缩空气站总电能表 | 空气压缩机站内 | 可 |

# 附录K 螺杆空气压缩机站报警信号、自动保护控制配置

| 序号 | 测点异常情况 | 位置 | 无油螺杆 | | 喷油螺杆 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 报警信号 | 自动保护 | 报警信号装设程度要求 | 自动保护 |
| 一、温度 | | | | | | |
| 1 | 空气压缩机排气温度高 | 设备内部 | 应 | 自动停机 | 应 | 自动停机 |
| 2 | 空气压缩机排气温度低 | 设备内部 | — | — | 宜 | — |
| 3 | 空气压缩机组润滑油温度高 | 设备内部 | 宜 | — | 宜 | — |
| 4 | 冷却水回水温度高 | 管网 | 宜 | — | 宜 | — |
| 二、压力 | | | | | | |
| 1 | 压缩空气站供气总管压力低 | 管网 | 应 | — | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机各级排气压力高 | 设备内部 | 应 | — | 应 | — |
| 3 | 空气压缩机组冷却水进水（阀后）流量低或压力低 | 管网 | 应 | 自动停机 | 应 | 自动停机 |
| 4 | 空气压缩机吸气压力低 | 设备内部 | 宜 | — | — | — |
| 5 | 空气压缩机组油气分离器压差大 | 设备内部 | — | — | 应 | — |
| 6 | 空气压缩机组油过滤器压差大 | 设备内部 | 应 | — | 应 | — |
| 7 | 空气压缩机组润滑油压力低 | 设备内部 | 应 | 自动停机 | 应 | 自动停机 |
| 三、液位 | | | | | | |
| 1 | 空气压缩机组润滑油箱油位低 | 设备内部 | 应 | — | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机组润滑油箱油位高 | 设备内部 | — | — | 应 | — |
| 四、其他 | | | | | | |
| 1 | 空气压缩机组控制电源故障 | 设备内部 | 应 | — | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机组电流高 | 设备内部 | 应 | 自动停机 | 应 | 自动停机 |
| 3 | 空气压缩机组转速高（采用可变速电动机时） | 设备内部 | 应 | 自动停机 | 应 | 自动停机 |

注 报警装置参数异常时应报警，报警参数值仍继续越线时应自动停机。

# 附录L 离心空气压缩机站报警信号、自动保护控制配置

| 序号 | 测点异常情况 | 位置 | 报警信号装设程度要求 | 自动保护 |
|---|---|---|---|---|
| 一、温度 | | | | |
| 1 | 空气压缩机各段排气温度高 | 设备内部 | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机轴承温度高 | 设备内部 | 应 | — |
| 3 | 润滑油冷却器出油温度高 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 4 | 压缩机电动机定子温度高 | 设备内部 | 宜 | — |
| 二、压力 | | | | |
| 1 | 空气压缩机各段排气压力高 | 设备内部 | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机润滑油油压低 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 3 | 空气压缩机组油过滤器压差大 | 设备内部 | 应 | — |
| 4 | 空气压缩机冷却水进口（阀后）压力高或压力低 | 管网 | 应 | — |
| 5 | 压缩空气站供气母管压力低 | 管网 | 应 | — |
| 三、流量 | | | | |
| 1 | 空气压缩机组冷却水进口（阀后）流量低 | 管网 | 应 | — |
| 四、液位 | | | | |
| 1 | 润滑油箱油位低 | 设备内部 | 应 | — |
| 五、机械量 | | | | |
| 1 | 空气压缩机轴振动大 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 2 | 空气压缩机轴位移大 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 3 | 空气压缩机喘振 | 设备内部 | 应 | 紧急放空 |
| 六、其他 | | | | |
| 1 | 空气压缩机组控制电源故障 | 设备内部 | 应 | — |
| 2 | 空气压缩机组转速高（采用可变频电动机时） | 设备内部 | 应 | 自动停机 |

注 报警装置参数异常时应报警，报警值仍继续越线时应自动紧急放空或停机。

# 附录M 空气干燥净化装置报警信号、自动保护控制配置

| 序号 | 测点异常情况 | 位置 | 热工报警信号装设程度要求 | 自动保护 |
|---|---|---|---|---|
| 一、温度 | | | | |
| 1 | 加热再生吸附式空气干燥装置加热器超温 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 2 | 加热再生吸附式空气干燥装置再生气进气超温 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 3 | 冷冻空气干燥器装置蒸发温度低 | 设备内部 | 应 | 自动停机 |
| 二、压力 | | | | |
| 1 | 油过滤器压差大 | 设备内部 | 应 | — |
| 三、其他 | | | | |
| 1 | 空气干燥器装置程序控制器故障 | 设备内部 | 宜 | — |

注 报警装置参数异常时应报警，报警参数值仍继续越线时自动停机。

# 附录N　灰斗、料仓气化压力计算

灰斗、料仓的气化压力以往的计算公式，得出的数据与实际偏差较大，下面介绍一种较为准确的计算方法。

## N.1　锥底料仓

锥底料仓气化压力图如图 N-1 所示。

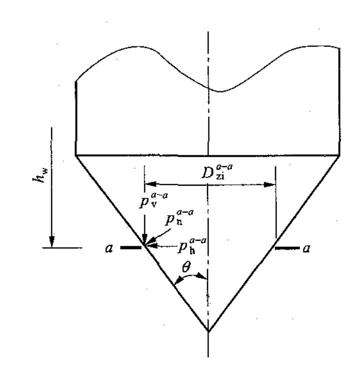



图 N-1　锥底料仓 a–a 处气化压力图

首先计算特性纵坐标值 $A_z$

$$A_z=\frac{D_{zi}^{a-a}}{4\tan\varphi_0\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_i}{2}\right)}-\frac{h_{zc}}{3} \quad \text{(N-1)}$$

$$h_{zc}=\frac{D_{zi}^{a-a}}{2}\tan\varphi \quad \text{(N-2)}$$

式中　$D_{zi}^{a-a}$——料仓锥体部分气化装置 a–a 处的直径，mm；

$\varphi_0$——物料壁面摩擦角，(°)，根据实验测得，部分物料可查阅附录 B；

$\varphi_i$——物料内摩擦角（外摩擦角），(°)，根据实验测得，部分物料可查阅附录 B；

$h_{zc}$——计气化装置 a-a 处的锥角高，mm。

气化装置板侧垂直方向分力 $p_v^{a-a}$，按式（N-3）计算

$$p_v^{a-a}=\rho g\left[h_w\left(\frac{h_w}{A_z}+1\right)^{-1}+\frac{h_{zc}}{3}\right]\times10^{-6} \quad \text{(N-3)}$$

式中　$p_v^{a-a}$——气化装置 a–a 处板侧的垂直方向分力，kPa。

气化装置板侧水平方向分力 $p_h^{a-a}$，按式（N-4）计算

$$p_h^{a-a}=\frac{\rho g D_{zi}}{4\tan\varphi_0}\left[1-\left(\frac{h_w}{A_z}+1\right)^{-2}\right]\times10^{-6} \quad \text{(N-4)}$$

式中　$p_h^{a-a}$——气化装置 a–a 处板侧的水平方向分力，kPa。

气化装置 a–a 处的板侧压力 $p_n^{a-a}$，按式（N-5）计算

$$p_n^{a-a}=p_v^{a-a}\sin^2\theta+p_h^{a-a}\cos^2\theta \quad \text{(N-5)}$$

式中　$p_n^{a-a}$——气化装置 a–a 处板侧压力，kPa。

因此，气化风机的压力按式（N-6）计算

$$p_F=(p_n^{a-a}+\Delta p_F)\times110\% \quad \text{(N-6)}$$

式中　$\Delta p_F$——管道和气化装置压力损失，kPa。

## N.2　平底料仓

平底料仓气化压力图如图 N-2 所示。

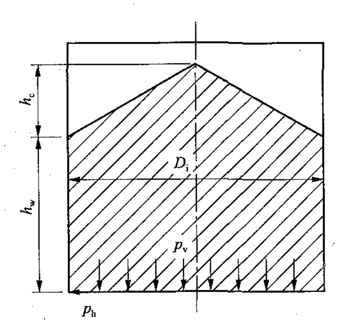



图 N-2　平底料仓气化压力图

首先，计算特性纵坐标值 A

$$A=\frac{D_i}{4\tan\varphi_0\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_i}{2}\right)}-\frac{h_c}{3} \quad \text{(N-7)}$$

$$h_c=\frac{D_i}{2}\tan\varphi_i \quad \text{(N-8)}$$

式中　$D_i$——料仓直筒部分内壁直径，mm；

$h_c$——料仓物料自然堆积的锥体高度，mm。

气化板侧压力 $p_v$，按式（N-9）计算

$$p_v=\rho g\left[h_w\left(\frac{h_w}{A}+1\right)^{-1}+\frac{h_c}{3}\right]\times10^{-6} \quad \text{(N-9)}$$

式中　$h_w$——物料自然堆积锥体底部距离库底的高度，mm。

风机压力按式（N-10）计算

$$p_F=(p_v+\Delta p_F)\times110\% \quad \text{(N-10)}$$

# 附录P 全国主要城市气象资料

| 省/直辖市/自治区 | | 北京(01) | 天津（02） | | 河北（03） | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 北京 | 天津 | 塘沽 | 石家庄 | 唐山 | 邢台 | 保定 | 张家口 |
| 海拔（m） | | 31.1 | 2.5 | 2.8 | 81 | 27.8 | 70.8 | 17.2 | 724.2 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 12.3 | 12.7 | 12.6 | 13.4 | 11.5 | 13.9 | 12.9 | 8.8 |
| | 冬季采暖计算温度 | –7.6 | –7.0 | –6.8 | –6.2 | –9.2 | –5.5 | –7.0 | –13.6 |
| | 冬季空调计算温度 | –9.9 | –9.6 | –9.2 | –8.8 | –11.8 | –8.0 | –9.5 | –16.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | –0.7 | –0.6 | –0.4 | 0.1 | –1.6 | 0.5 | –0.5 | –3.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 1.5 | –0.7 | 1.8 | 0.7 | –2.6 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 33.5 | 33.9 | 32.5 | 35.1 | 32.9 | 35.1 | 34.8 | 32.1 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 26.4 | 26.8 | 26.9 | 26.8 | 26.3 | 26.9 | 26.9 | 22.6 |
| | 夏季空调日平均温度 | 29.6 | 29.4 | 29.6 | 30.0 | 28.5 | 30.2 | 29.8 | 27.9 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 44 | 56 | 59 | 55 | 55 | 57 | 55 | 41.9 |
| | 夏季通风相对湿度 | 61 | 63 | 68 | 60 | 63 | 61 | 61 | 50 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.0 | 2.4 | 4.2 | 1.7 | 2.3 | 1.7 | 2.0 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 2.6 | 2.4 | 4.3 | 2.6 | 2.8 | 2.3 | 2.5 | 2.9 |
| 风向及频率（%） | 夏季最多风向及频率 | C/N（19/12） | C/N（20/11） | SSE（12） | C/S（26/13） | C/ESE（14/11） | C/SSW（23/13） | C/SW（18/14） | C/SE（19/15） |
| | 冬季最多风向及频率 | C/SW（17/10） | C/SW（16/9） | NNW（8） | C/S（25/12） | C/ESE（17/8） | C/SSW（24/13） | C/SW（19/14） | N（26） |
| 最大冻土深度（cm） | | 66 | 58 | 59 | 56 | 72 | 46 | 58 | 136 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1021.7 | 1027.1 | 1026.3 | 1017.2 | 1023.6 | 1017.7 | 1025.1 | 939.5 |
| | 夏季大气压力 | 1000.2 | 1005.2 | 1004.6 | 995.8 | 1002.4 | 996.2 | 1002.9 | 925.0 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 123 | 121 | 122 | 111 | 130 | 105 | 119 | 146 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.12～03.14 | 11.13～03.13 | 11.15～03.16 | 11.15～03.15 | 11.10～03.19 | 11.13～03.03 | 11.13～03.11 | 11.03～03.28 |
| | ≤8℃的天数 | 144 | 142 | 143 | 140 | 146 | 129 | 142 | 168 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.04～03.27 | 11.06～03.27 | 11.07～03.29 | 11.07～03.26 | 11.04～03.29 | 11.08～03.16 | 11.05～03.27 | 10.20～04.05 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 41.9 | 40.5 | 40.9 | 41.5 | 39.6 | 41.1 | 41.6 | 39.2 |
| | 极端最低温度 | –18.3 | –17.8 | –15.4 | –19.3 | –22.7 | –20.2 | –19.6 | –24.6 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 河北（03） | | | | | 山西（04） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 承德 | 秦皇岛 | 沧州 | 廊坊 | 衡水 | 太原 | 大同 | 阳泉 |
| 海拔（m） | | 377.2 | 2.6 | 9.6 | 9.0 | 18.9 | 778.3 | 1067.2 | 741.9 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 9.1 | 11.0 | 12.9 | 12.2 | 12.5 | 10.0 | 7.0 | 11.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | –13.3 | –9.6 | –7.1 | –8.3 | –7.9 | –10.1 | –16.3 | –8.3 |
| | 冬季空调计算温度 | –15.7 | –12.0 | –9.6 | –11.0 | –10.4 | –12.8 | –18.9 | –11.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | –4.1 | –1.2 | –0.5 | –1.3 | –0.9 | –1.7 | –4.8 | –0.5 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | –2.9 | –0.3 | 0.7 | –0.3 | 0.2 | –0.7 | –3.5 | 0.3 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.7 | 30.6 | 34.3 | 34.4 | 34.8 | 31.5 | 30.9 | 32.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 24.1 | 25.9 | 26.7 | 26.6 | 26.9 | 23.8 | 21.2 | 23.6 |
| | 夏季空调日平均温度 | 27.4 | 27.7 | 29.7 | 29.6 | 29.6 | 26.1 | 25.3 | 27.4 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 51 | 51 | 57 | 54 | 59 | 50 | 50 | 43 |
| | 夏季通风相对湿度 | 55 | 55 | 63 | 61 | 61 | 58 | 49 | 55 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 2.9 | 2.2 | 2.8 | 2.85 | 1.6 |
| | 冬季平均风速 | 1.9 | 2.5 | 2.7 | 2.5 | 3.0 | 2.4 | 3.1 | 2.3 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSW（61/6） | C/WSW（19/10） | SW（12） | C/SW（12/9） | C/SW（15/11） | C/N（30/10） | NNE（17/12） | C/NNW（33/19） |
| | 冬季风向及频率 | C/SW（17/10） | C/SW（16/9） | SW（12） | C/NE（19/11） | C/SW（19/9） | C/N（30/13） | N（19） | C/NNW（30/19） |
| 最大冻土深度（cm） | | 126 | 85 | 43 | 67 | 77 | 72 | 186 | 62 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 980.5 | 1026.4 | 1027.0 | 1026.4 | 1024.9 | 933.5 | 899.9 | 937.1 |
| | 夏季大气压力 | 963.3 | 1005.6 | 1004.0 | 1004.4 | 1002.8 | 919.8 | 899.1 | 923.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 145 | 135 | 141 | 143 | 143 | 160 | 183 | 146 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.03～03.27 | 11.12～03.26 | 11.15～03.12 | 11.11～03.14 | 11.12～03.13 | 11.06～03.26 | 10.24～04.04 | 11.12～03.17 |
| | ≤8℃的天数 | 166 | 153 | 141 | 143 | 143 | 160 | 183 | 146 |
| | ≤8℃的起止日 | 10.21～04.04 | 11.04～04.05 | 11.07～03.27 | 11.05～03.26 | 11.05～03.27 | 10.23～03.31 | 10.14～04.14 | 11.04～03.29 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 43.3 | 39.2 | 40.5 | 41.3 | 41.2 | 37.4 | 37.2 | 40.2 |
| | 极端最低温度 | –24.2 | –20.8 | –19.3 | –21.5 | –22.6 | –22.7 | –27.2 | –16.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 山西（04） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 运城 | 晋城 | 朔州 | 晋中 | 锦州 | 临汾 | 吕梁 |
| 海拔（m） | | 376.0 | 659.5 | 1345.8 | 1041.4 | 828.2 | 449.5 | 950.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 14.0 | 11.8 | 3.9 | 8.8 | 9.0 | 12.6 | 9.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | -4.5 | -6.6 | -20.8 | -11.1 | -12.3 | -6.6 | -12.6 |
| | 冬季空调计算温度 | -7.1 | -9.1 | -25.4 | -13.6 | -14.7 | -10.0 | -16.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 0.9 | 0.0 | -6.9 | -2.6 | -3.2 | -0.2 | -3.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 2.0 | 1.0 | -5.2 | -1.3 | -1.9 | 1.1 | -1.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.8 | 32.7 | 29.0 | 30.8 | 31.8 | 34.6 | 32.4 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 26.0 | 24.6 | 19.8 | 22.3 | 22.9 | 25.7 | 22.9 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.5 | 27.3 | 22.5 | 24.8 | 26.2 | 29.3 | 26.3 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 57 | 53 | 61 | 49 | 47 | 58 | 56 |
| | 夏季通风相对湿度 | 55 | 59 | 50 | 55 | 53 | 56 | 52 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.1 | 1.7 | 2.1 | 1.5 | 1.9 | 1.8 | 2.6 |
| | 冬季平均风速 | 2.4 | 1.9 | 2.3 | 1.3 | 2.3 | 1.6 | 2.1 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | SSE（18） | C/SSE（35/11） | C/ESE（30/11） | C/SSW（39/9） | C/NNE（20/11） | C/SW（24/9） | C/EN（22/17） |
| | 冬季风向及频率 | C/W（24/9） | C/NW（42/12） | C/NW（41/11） | C/E（42/14） | C/NNE（26/14） | C/SW（357） | NE（26） |
| 最大冻土深度（cm） | | 39 | 39 | 169 | 76 | 121 | 57 | 104 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 982.7 | 947.4 | 868.6 | 902.6 | 926.9 | 972.5 | 914.5 |
| | 夏季大气压力 | 962.7 | 932.4 | 860.7 | 892.6 | 913.8 | 954.2 | 901.3 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 101 | 120 | 182 | 144 | 145 | 114 | 143 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.22～03.02 | 11.14～03.13 | 10.14～04.13 | 11.05～03.28 | 11.03～03.27 | 11.13～03.06 | 11.05～03.27 |
| | ≤8℃的天数 | 127 | 143 | 208 | 168 | 168 | 142 | 166 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.08～03.14 | 11.06～03.28 | 10.01～04.26 | 10.20～04.05 | 10.20～04.05 | 11.06～03.27 | 10.20～04.03 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 41.2 | 38.5 | 34.4 | 36.7 | 38.1 | 40.5 | 38.4 |
| | 极端最低温度 | -18.9 | -17.2 | -40.4 | -25.1 | -25.8 | -22.1 | -26.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 内蒙古（05） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 呼和浩特 | 包头 | 赤峰 | 通辽 | 鄂尔多斯 | 满洲里 | 海拉尔 | 临河 |
| 海拔（m） | | 1063.9 | 1067.2 | 568.0 | 178.5 | 1460.4 | 661.7 | 610.2 | 1039.3 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 6.7 | 7.2 | 7.5 | 6.6 | 6.2 | –0.7 | –1.0 | 8.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | –17.0 | –16.6 | –16.2 | –19.0 | –16.8 | –28.6 | –31.6 | –15.3 |
| | 冬季空调计算温度 | –20.3 | –19.7 | –18.8 | 21.8 | 19.6 | –31.6 | –34.5 | –19.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | –5.3 | –5.1 | –5.0 | –6.7 | –4.9 | –12.4 | –12.7 | –4.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | –4.1 | –3.9 | –3.8 | –5.4 | –3.6 | –10.8 | –11.0 | –3.3 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 30.6 | 31.7 | 32.7 | 32.3 | 29.1 | 29.0 | 29.0 | 32.7 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 21.0 | 20.9 | 22.6 | 24.5 | 19.0 | 19.9 | 20.5 | 20.9 |
| | 夏季空调日平均温度 | 25.9 | 26.5 | 27.4 | 27.3 | 24.6 | 23.6 | 23.5 | 27.5 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 58 | 55 | 43 | 54 | 52 | 75 | 79 | 51 |
| | 夏季通风相对湿度 | 48 | 43 | 50 | 57 | 43 | 52 | 54 | 39 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.8 | 2.6 | 2.2 | 3.5 | 3.1 | 3.8 | 3.0 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 1.5 | 2.4 | 2.3 | 3.7 | 2.9 | 3.7 | 2.3 | 2.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SW（36/8） | C/SE（14/11） | C/WSW（20/13） | SSW（17） | SSW（19） | C/E（13/10） | C/SSW（13/8） | C/E（20/10） |
| | 冬季风向及频率 | C/NNW（50/9） | N（21） | C/W（26/14） | NW（16） | SSW（14） | WSW（29） | C/SSW（22/19） | C/W（30/13） |
| 最大冻土深度（cm） | | 156 | 157 | 201 | 179 | 150 | 389 | 242 | 138 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 901.2 | 901. 2 | 955.1 | 1002. 6 | 856.7 | 941.9 | 947.9 | 903.8 |
| | 夏季大气压力 | 889.6 | 889.1 | 941.1 | 984.4 | 849.5 | 930.3 | 935.7 | 891.1 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 167 | 164 | 161 | 166 | 168 | 210 | 208 | 157 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.20～04.04 | 10.21～04.02 | 10.26～04.04 | 10.21～04.04 | 10.20～04.05 | 09.30～04.27 | 10.01～04.26 | 10.24～03.29 |
| | ≤8℃的天数 | 184 | 182 | 179 | 184 | 189 | 229 | 227 | 175 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.12～04.13 | 10.13～04.12 | 10.16～04.17 | 10.13～04.14 | 10.11～04.17 | 9.21～05.07 | 09.22～05.06 | 10.16～04.08 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 38.5 | 39.2 | 40.4 | 38.9 | 35.3 | 37.9 | 36.6 | 39.4 |
| | 极端最低温度 | –30.5 | –31.4 | –28.8 | –31.6 | –28.4 | –40.5 | –42.3 | –35.3 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 内蒙古（05） | | | | 辽宁（06） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 集宁 | 乌兰浩特 | 二连浩特 | 锡林浩特 | 沈阳 | 大连 | 鞍山 | 抚顺 |
| 海拔（m） | | 1419.3 | 274.7 | 964.7 | 989.5 | 44.7 | 91.5 | 77.3 | 118.5 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 4.3 | 5.0 | 4.0 | 2.6 | 8.4 | 10.9 | 9.6 | 6.8 |
| | 冬季采暖计算温度 | –18.9 | –20.5 | –24.3 | –25.2 | –16.9 | –9.8 | –15.1 | –20 |
| | 冬季空调计算温度 | –21.9 | –23.5 | –27.8 | –27.8 | –20.7 | –13.0 | –18.0 | –23.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | –6.4 | –7.8 | –9.3 | –9.7 | –5.1 | –0.7 | –3.8 | –6.3 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | –4.7 | –6.5 | –8.1 | –8.1 | –3.6 | 0.3 | –2.5 | –4.8 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 28.2 | 31.8 | 33.2 | 31.1 | 31.5 | 29.0 | 31.6 | 31.5 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 18.8 | 23.0 | 19.3 | 19.9 | 25.3 | 24.9 | 25.1 | 24.8 |
| | 夏季空调日平均温度 | 22.9 | 26.6 | 27.5 | 25.4 | 27.5 | 26.5 | 28.1 | 26.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 55 | 54 | 69 | 72 | 60 | 56 | 54 | 68 |
| | 夏季通风相对湿度 | 49 | 55 | 33 | 44 | 65 | 71 | 63 | 65 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.4 | 2.6 | 5.2 | 3.4 | 3.5 | 4.6 | 3.6 | 2.2 |
| | 冬季平均风速 | 3.0 | 2.6 | 3.6 | 3.2 | 2.6 | 5.2 | 2.9 | 2.3 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/WNW（29/9） | C/NE（23/7） | NW（8） | C/SW（13/9） | SW（16） | SSW（19） | SW（13） | C/NE（15/12） |
| | 冬季风向及频率 | C/WNW（33/13） | C/NW（27/17） | NW（16） | WSW（19） | C/NNE（13/10） | NNE（24） | NE（14） | ENE（20） |
| 最大冻土深度（cm） | | 184 | 249 | 310 | 265 | 148 | 90 | 118 | 143 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 860.2 | 989.1 | 910.5 | 906.4 | 1020.8 | 1013.9 | 1018.5 | 1011.0 |
| | 夏季大气压力 | 853.7 | 973.3 | 998.3 | 895.9 | 1000.9 | 997.8 | 998.8 | 992.4 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 181 | 176 | 181 | 189 | 152 | 132 | 143 | 161 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.16～04.14 | 10.17～04.10 | 10.14～04.12 | 10.11～04.17 | 10.30～03.30 | 11.16～03.27 | 11.06～03.28 | 10.26～04.04 |
| | ≤8℃的天数 | 206 | 193 | 196 | 209 | 172 | 152 | 163 | 182 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.03～04.26 | 10.09～04.19 | 10.07～04.20 | 10.01～04.27 | 10.20～04.09 | 11.06～04.06 | 10.26～04.06 | 10.14～04.13 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 33.6 | 40.3 | 41.1 | 39.2 | 36.1 | 35.3 | 36.5 | 37.7 |
| | 极端最低温度 | –32.4 | –33.7 | –37.1 | –38.0 | –29.4 | –18.8 | –26.9 | –35.9 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 辽宁（06） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 本溪 | 丹东 | 锦州 | 营口 | 阜新 | 开源 | 朝阳 | 葫芦岛 |
| 海拔（m） | | 185.2 | 13.8 | 65.9 | 3.3 | 166.8 | 98.2 | 169.9 | 8.5 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 7.8 | 8.9 | 9.5 | 9.5 | 8.1 | 7.0 | 9.0 | 9.2 |
| | 冬季采暖计算温度 | −18.1 | −12.9 | −13.1 | −14.1 | −15.7 | −20.0 | −15.3 | −12.6 |
| | 冬季空调计算温度 | −21.5 | −15.9 | −15.5 | −17.1 | −18.5 | −23.5 | −18.3 | −15.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −5.1 | −2.8 | −3.4 | −3.6 | −4.8 | −6.4 | −4.7 | −3.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −3.8 | −1.7 | −2.2 | −2.4 | −3.7 | −4.9 | −3.2 | −1.9 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 30 | 29.6 | 31.4 | 30.4 | 32.5 | 31.1 | 33.5 | 29.5 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 24.3 | 25.3 | 25.2 | 25.5 | 24.7 | 25.0 | 25.0 | 26.8 |
| | 夏季空调日平均温度 | 27.1 | 25.9 | 27.1 | 27.5 | 27.3 | 26.8 | 28.3 | 26.4 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 64 | 55 | 52 | 62 | 49 | 49 | 48 | 52 |
| | 夏季通风相对湿度 | 63 | 71 | 67 | 68 | 60 | 60 | 58 | 76 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.2 | 2.3 | 3.3 | 3.7 | 2.1 | 2.7 | 2.5 | 2.4 |
| | 冬季平均风速 | 2.4 | 3.4 | 3.2 | 3.6 | 2.1 | 2.7 | 2.4 | 2.2 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ESE（19/15） | C/SSW（17/13） | SW（18） | SW（17） | C/SW（29/21） | SSW（17） | C/SSW（32/22） | C/SSW（25/16） |
| | 冬季风向及频率 | ESE（25） | N（21） | C/NNE（21/15） | NE（16） | C/N（36/9） | C/SW（16/15） | C/SSW（40/12） | C/NNE（34/13） |
| 最大冻土深度（cm） | | 149 | 88 | 108 | 101 | 139 | 137 | 135 | 99 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1021.7 | 1023.7 | 1017.8 | 1026.1 | 1007.0 | 1018.4 | 1004.5 | 1025.5 |
| | 夏季大气压力 | 1000.2 | 1005.2 | 997.8 | 1005.5 | 988.1 | 994.6 | 985.5 | 1004.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 157 | 145 | 144 | 144 | 159 | 160 | 145 | 145 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.28～04.04 | 11.07～03.31 | 11.05～03.28 | 11.06～03.29 | 10.27～04.04 | 10.27～04.03 | 11.04～03.28 | 11.06～03.30 |
| | ≤8℃的天数 | 175 | 167 | 164 | 164 | 176 | 180 | 167 | 167 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.18～04.10 | 10.27～04.11 | 10.26～04.06 | 10.26～04.07 | 10.18～04.11 | 10.16～04.13 | 10.21～04.05 | 10.26～04.10 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 37.5 | 35.3 | 41.8 | 34.7 | 40.9 | 36.6 | 43.3 | 40.8 |
| | 极端最低温度 | −33.6 | −25.8 | −22.8 | −28.4 | −27.1 | −36.3 | −34.4 | −27.5 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 吉林（07） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 长春 | 四平 | 吉林 | 通化 | 白山 | 松原 | 白城 | 延吉 |
| 海拔（m） | | 236.8 | 183.4 | 164.2 | 402.9 | 332.7 | 146.3 | 155.2 | 176.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 5.7 | 4.8 | 6.7 | 5.6 | 5.3 | 5.4 | 5.0 | 5.4 |
| | 冬季采暖计算温度 | −21.1 | −24.0 | −19.7 | −21.0 | −21.5 | −21.6 | −21.7 | −18.4 |
| | 冬季空调计算温度 | −24.3 | −27.5 | −22.8 | −24.2 | −24.4 | −24.5 | −25.3 | −21.3 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −7.6 | −8.5 | −6.6 | −6.6 | −7.2 | −8.4 | −8.6 | −6.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −6.1 | −7.1 | −5.0 | −5.3 | −5.7 | −6.9 | −7.1 | −5.1 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 30.5 | 30.4 | 30.7 | 29.9 | 30.8 | 31.8 | 31.8 | 31.3 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 24.1 | 24.1 | 24.5 | 23.2 | 23.6 | 24.2 | 23.9 | 23.7 |
| | 夏季空调日平均温度 | 26.3 | 25.1 | 26.7 | 25.3 | 25.4 | 27.3 | 26.9 | 25.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 66 | 72 | 66 | 68 | 71 | 64 | 57 | 59 |
| | 夏季通风相对湿度 | 65 | 65 | 65 | 64 | 61 | 59 | 58 | 63 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.2 | 2.6 | 2.5 | 1.6 | 1.2 | 3.0 | 2.9 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 3.7 | 2.6 | 2.6 | 1.3 | 0.8 | 2.9 | 3.0 | 2.6 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | WSW（15） | C/SSE（20/11） | SW（17） | C/SW（41/12） | C/NNE（42/14） | WSW（14） | C/SSW（13/10） | C/E（31/19） |
| | 冬季风向及频率 | WSW（20） | C/WSW（31/18） | C/SW（15/15） | C/SW（53/7） | C/NNE（61/11） | WNW（12） | C/WNW（11/10） | C/WNW（42/19） |
| 最大冻土深度（cm） | | 169 | 182 | 148 | 139 | 136 | 220 | 750 | 198 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 994.4 | 1001.9 | 1004.3 | 974.7 | 983.9 | 1005.6 | 1004.6 | 1000.7 |
| | 夏季大气压力 | 978.4 | 984.8 | 986.7 | 961.0 | 987.9 | 987.9 | 986.9 | 986.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 169 | 172 | 168 | 170 | 170 | 170 | 172 | 171 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.20～04.06 | 10.18～04.07 | 10.25～04.05 | 10.20～04.07 | 10.20～04.07 | 10.19～04.06 | 10.18～04.07 | 10.20～04.08 |
| | ≤8℃的天数 | 188 | 191 | 184 | 189 | 191 | 190 | 191 | 192 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.12～04.17 | 10.11～04.19 | 10.13～04.14 | 10.12～04.18 | 10.11～04.19 | 10.11～04.18 | 10.10～04.18 | 10.11～04.20 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 35.7 | 35.7 | 37.3 | 35.6 | 37.9 | 38.5 | 38.6 | 37.7 |
| | 极端最低温度 | −33.0 | −40.3 | −32.3 | −33.1 | −33.8 | −34.8 | −38.1 | −32.7 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 黑龙江（08） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 哈尔滨 | 齐齐哈尔 | 鸡西 | 鹤岗 | 宜春 | 佳木斯 | 牡丹江 | 双鸭山 |
| 海拔（m） | | 142.3 | 145.9 | 238.3 | 227.9 | 240.9 | 81.2 | 241.4 | 83.0 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 4.2 | 3.9 | 4.2 | 3.5 | 1.2 | 3.6 | 4.3 | 4.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | −24.2 | −23.8 | −21.5 | −22.7 | −28.3 | 24.0 | −22.4 | −23.2 |
| | 冬季空调计算温度 | −27.1 | −27.2 | −24.4 | −25.3 | −31.3 | −27.4 | −25.8 | −25.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −9.4 | −9.5 | −8.3 | −9.0 | −11.8 | −9.6 | −8.6 | −8.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −7.8 | −8.1 | −7.0 | −7.3 | −9.9 | −8.1 | −7.3 | −7.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 30.7 | 31.1 | 30.5 | 29.9 | 29.8 | 30.8 | 31.0 | 30.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 23.9 | 23.5 | 23.2 | 22.7 | 22.5 | 23.6 | 23.5 | 23.4 |
| | 夏季空调日平均温度 | 26.3 | 26.7 | 25.7 | 25.6 | 24.0 | 26.0 | 25.0 | 26.1 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 73 | 67 | 64 | 63 | 73 | 70 | 69 | 65 |
| | 夏季通风相对湿度 | 62 | 58 | 61 | 62 | 60 | 61 | 59 | 61 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.2 | 3.0 | 2.3 | 2.9 | 2.0 | 2.8 | 2.1 | 3.1 |
| | 冬季平均风速 | 3.2 | 2.6 | 3.5 | 3.1 | 1.8 | 3.1 | 2.2 | 3.7 |
| 最多风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | SSW（12） | SSW（10） | C/WNW（22/11） | C/ESE（11/11） | C/ENE（20/11） | C/WSW（20/12） | C/WSW（18/14） | SSW（18） |
| | 冬季风向及频率 | SW（14） | NNW（13） | WNW（31） | NW（13） | C/WNW（30/16） | C/W（21/19） | C/WSW（18/14） | C/NNW（18/14） |
| 最大冻土深度（cm） | | 205 | 209 | 238 | 221 | 278 | 220 | 191 | 260 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1004.2 | 1005.0 | 991.9 | 991.3 | 991.8 | 1011.3 | 992.2 | 1010.5 |
| | 夏季大气压力 | 987.7 | 987.9 | 979.7 | 979.5 | 978.5 | 996.4 | 978.9 | 996.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 176 | 181 | 179 | 184 | 190 | 180 | 177 | 179 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.17～04.10 | 10.15～04.13 | 10.17～04.13 | 10.14～04.15 | 10.10～04.17 | 10.16～04.18 | 10.17～04.11 | 10.17～04.13 |
| | ≤8℃的天数 | 195 | 198 | 195 | 206 | 212 | 198 | 194 | 194 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.08～04.20 | 10.06～04.21 | 10.09～04.21 | 10.04～04.27 | 09.30～04.29 | 10.06～04.21 | 10.09～04.20 | 10.10～04.21 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 36.7 | 40.1 | 37.6 | 37.7 | 35.3 | 38.1 | 38.4 | 37.2 |
| | 极端最低温度 | −37.7 | −36.4 | −32.5 | −34.5 | −41.2 | −39.5 | −35.1 | −37.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 黑龙江（08） | | | | 上海（09） | 江苏（10） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 黑河 | 绥化 | 漠河 | 加格达奇 | 上海 | 南京 | 徐州 | 南通 |
| 海拔（m） | | 166.4 | 179.6 | 433.0 | 371.7 | 2.6 | 8.9 | 41.0 | 6.1 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 0.4 | 2.8 | −4.3 | −0.8 | 16.1 | 15.5 | 14.5 | 15.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | −29.5 | −26.7 | −37.5 | −29.7 | −0.3 | −1.8 | −3.6 | −1.0 |
| | 冬季空调计算温度 | −33.2 | −30.3 | −41.0 | −32.9 | −2.2 | −4.1 | −5.9 | −3.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −12.5 | −10.8 | −16.1 | −12.4 | 4.1 | 3.2 | 2.0 | 3.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −10.6 | −8.9 | −14.2 | −10.8 | 5.2 | 4.2 | 3.0 | 4.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 29.4 | 30.1 | 29.1 | 28.8 | 34.4 | 34.8 | 34.3 | 33.5 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 22.3 | 23.4 | 20.8 | 21.2 | 27.9 | 28.1 | 27.6 | 28.1 |
| | 夏季空调日平均温度 | 24.2 | 25.6 | 21.6 | 22.2 | 30.8 | 31.2 | 30.5 | 30.3 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 70 | 76 | 73 | 72 | 75 | 76 | 66 | 75 |
| | 夏季通风相对湿度 | 62 | 63 | 57 | 61 | 69 | 69 | 67 | 72 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.6 | 3.5 | 1.9 | 2.2 | 3.1 | 2.6 | 2.6 | 3.0 |
| | 冬季平均风速 | 2.8 | 3.2 | 1.3 | 1.6 | 2.6 | 2.4 | 2.3 | 3.6 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/NNW（17/16） | SSE（11） | C/NW（24/8） | C/NW（23/12） | SE（14） | C/SSW（18/11） | C/ESE（15/11） | NE（13） |
| | 冬季风向及频率 | NNW（41） | NNW（9） | C/N（55/10） | C/NW（47/19） | NW（14） | C/ENE（28/10） | C/W（23/12） | N（12） |
| 最大冻土深度（cm） | | 263 | 715 | — | 288 | 8 | 9 | 21 | 12 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1000.6 | 1000.4 | 984.1 | 974.9 | 1025.4 | 1025.5 | 1022.1 | 1025.9 |
| | 夏季大气压力 | 986.2 | 984.9 | 969.4 | 962.7 | 1005.4 | 1004.3 | 1000.8 | 1005.5 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 197 | 184 | 224 | 208 | 42 | 77 | 97 | 57 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.06～04.20 | 10.12～04.14 | 09.23～05.04 | 10.02～04.27 | 01.01～02.11 | 12.08～02.13 | 11.27～03.03 | 12.19～02.13 |
| | ≤8℃的天数 | 219 | 206 | 244 | 227 | 93 | 109 | 124 | 110 |
| | ≤8℃的起止日期 | 09.29～05.05 | 10.03～04.24 | 09.13～05.14 | 09.22～05.06 | 12.06～03.07 | 11.24～03.12 | 11.14～03.17 | 11.27～03.16 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 37.2 | 38.3 | 38.0 | 37.2 | 39.4 | 39.7 | 40.6 | 38.5 |
| | 极端最低温度 | −44.5 | −41.8 | −49.6 | −45.4 | −10.1 | −13.1 | −15.8 | −9.6 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 江苏（10） | | | | | | 浙江（11） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 连云港 | 常州 | 淮安 | 盐城 | 扬州 | 苏州 | 杭州 | 温州 |
| 海拔（m） | | 2.3 | 4.9 | 17.5 | 2.0 | 5.4 | 17.5 | 41.7 | 28.3 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 13.6 | 15.8 | 14.4 | 14.0 | 14.8 | 16.1 | 16.5 | 18.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | –4.2 | –1.2 | –3.3 | –2.1 | –2.3 | –0.4 | 0.0 | 3.4 |
| | 冬季空调计算温度 | –6.4 | –3.5 | –5.6 | –5.0 | –4.3 | –2.5 | –2.4 | 1.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 1.4 | 3.6 | 2.3 | 2.2 | 2.8 | 3.8 | 4.2 | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 2.6 | 1.7 | 3.7 | 3.4 | 4.0 | 5.0 | 5.4 | 7.5 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.7 | 34.6 | 33.4 | 33.2 | 34.0 | 34.4 | 35.6 | 33.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.2 | 28.1 | 28.1 | 28.0 | 28.3 | 28.3 | 27.9 | 28.3 |
| | 夏季空调日平均温度 | 29.5 | 31.5 | 30.2 | 29.7 | 30.6 | 31.3 | 31.6 | 29.9 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 67 | 75 | 72 | 74 | 75 | 77 | 76 | 76 |
| | 夏季通风相对湿度 | 75 | 68 | 72 | 73 | 72 | 70 | 64 | 72 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.9 | 2.8 | 2.5 | 3.2 | 2.5 | 3.5 | 2.4 | 2.0 |
| | 冬季平均风速 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 3.2 | 2.6 | 3.5 | 2.3 | 1.8 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | E（12） | SE（17） | ESE（12） | SSE（17） | ES（14） | SE（15） | SW（17） | C/ESE（29/18） |
| | 冬季风向及频率 | NNE（11） | C/NE（9） | C/ENE（14/9） | N（11） | NE（9） | N（16） | C/N（20/15） | C/NW（30/16） |
| 最大冻土深度（cm） | | 20 | 12 | 20 | 21 | 14 | 8 | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1026.3 | 1026.1 | 1025.0 | 1026.0 | 1026.2 | 1024.1 | 1021.1 | 1023.7 |
| | 夏季大气压力 | 1025.1 | 1026.1 | 1025.0 | 1026.0 | 1026.2 | 1024.1 | 1021.1 | 1023.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 102 | 56 | 93 | 94 | 87 | 50 | 40 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.26～03.07 | 12.19～02.12 | 12.02～03.04 | 12.02～03.05 | 12.07～03.03 | 12.24～02.11 | 01.02～02.10 | — |
| | ≤8℃的天数 | 134 | 102 | 130 | 130 | 119 | 96 | 90 | 33 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.14～03.27 | 11.27～03.08 | 11.17～03.26 | 11.19～03.28 | 11.23～03.21 | 12.02～03.07 | 12.06～03.05 | 01.10～02.11 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 38.7 | 39.4 | 38.2 | 37.7 | 38.2 | 38.8 | 39.9 | 39.6 |
| | 极端最低温度 | –13.8 | –12.8 | –14.2 | –12.3 | –11.5 | –8.3 | –8.6 | –3.9 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 浙江（11） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 金华 | 衢州 | 宁波 | 嘉兴 | 绍兴 | 盘山 | 台州 | 丽水 |
| 海拔（m） | | 62.6 | 66.9 | 4.8 | 5.4 | 104.3 | 35.7 | 95.9 | 60.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 17.8 | 17.3 | 16.5 | 15.8 | 16.5 | 16.4 | 17.1 | 18.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | 0.4 | 0.8 | 0.5 | −0.7 | −0.3 | 1.4 | 2.1 | 1.5 |
| | 冬季空调计算温度 | −1.7 | −1.1 | −1.5 | −2.5 | −2.6 | −0.5 | 0.1 | −0.7 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 4.8 | 4.8 | 4.6 | 3.9 | 4.4 | 4.8 | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 6.0 | 6.2 | 5.8 | 5.2 | 5.6 | 6.3 | 6.9 | 6.8 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 36.2 | 35.8 | 35.1 | 33.5 | 35.8 | 32.2 | 30.3 | 36.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.6 | 27.7 | 28.0 | 28.3 | 27.7 | 27.5 | 27.3 | 27.7 |
| | 夏季空调日平均温度 | 32.1 | 31.5 | 30.6 | 30.7 | 31.1 | 28.9 | 28.4 | 31.5 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 75 | 80 | 79 | 81 | 76 | 74 | 72 | 77 |
| | 夏季通风相对湿度 | 60 | 62 | 68 | 74 | 63 | 74 | 80 | 57 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.4 | 2.3 | 2.6 | 3.6 | 2.1 | 3.1 | 5.2 | 1.3 |
| | 冬季平均风速 | 2.7 | 2.5 | 2.3 | 3.1 | 2.7 | 3.1 | 5.3 | 1.7 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | ESE（20） | C/E（18/18） | S（17） | SSE（17） | C/NE（29/9） | C/SSE（16/15） | WSW（11） | C/ESE（41/10） |
| | 冬季风向及频率 | ESE（28） | E（17） | C/N（18/17） | NNW（14） | C/NNE（28/23） | C/N（19/18） | NNE（25） | C/E（45/14） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1017.9 | 1017.1 | 1025.7 | 1025.4 | 1012.9 | 1021.2 | 1012.9 | 1017.9 |
| | 夏季大气压力 | 998.6 | 997.8 | 1005.9 | 1005.3 | 994.0 | 1004.3 | 997.3 | 999.2 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 27 | 9 | 32 | 44 | 40 | 8 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 01.11～02.06 | 01.12～01.20 | 01.09～02.09 | 12.31～02.12 | 01.02～02.10 | 01.29～02.05 | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 68 | 68 | 88 | 99 | 91 | 77 | 43 | 57 |
| | ≤8℃的起止日期 | 12.09～02.14 | 12.09～02.14 | 12.08～03.05 | 12.05～03.05 | 12.05～03.05 | 12.19～03.05 | 01.02～02.13 | 12.18～02.12 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.5 | 40.0 | 39.5 | 40.3 | 38.6 | 34.7 | 41.3 | 40.3 |
| | 极端最低温度 | −9.6 | −10.0 | −8.5 | −10.6 | −9.6 | −5.5 | −4.6 | −7.5 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 安徽（12） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 合肥 | 芜湖 | 蚌埠 | 安庆 | 六安 | 亳州 | 黄山 | 滁州 |
| 海拔（m） | | 27.9 | 14.8 | 18.7 | 19.8 | 60.5 | 37.7 | 1840.4 | 27.5 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 15.8 | 16.0 | 15.4 | 16.8 | 16.7 | 14.7 | 8.0 | 15.4 |
| | 冬季采暖计算温度 | −1.7 | −1.3 | −2.6 | −0.2 | −1.8 | −3.5 | −9.9 | −1.8 |
| | 冬季空调计算温度 | −4.2 | −3.5 | −5.0 | 2.9 | −4.6 | −5.7 | −13.0 | −1.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 3.4 | 3.4 | 2.9 | 4.1 | 3.3 | 2.1 | 0.3 | 3.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 4.3 | 4.5 | 3.8 | 5.3 | 4.3 | 3.2 | 1.4 | 4.2 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.0 | 35.3 | 35.4 | 35.3 | 35.5 | 35.0 | 22.0 | 34.5 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.1 | 27.7 | 28.0 | 28.1 | 28.0 | 27.8 | 19.2 | 31.0 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.7 | 31.9 | 31.6 | 32.1 | 31.6 | 30.7 | 19.9 | 31.2 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 76 | 77 | 71 | 75 | 76 | 68 | 63 | 73.69 |
| | 夏季通风相对湿度 | 69 | 68 | 66 | 66 | 68 | 66 | 90 | 70 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.9 | 2.3 | 2.5 | 2.9 | 2.1 | 2.3 | 6.1 | 2.4 |
| | 冬季平均风速 | 2.7 | 2.2 | 2.3 | 3.2 | 2.0 | 2.5 | 6.3 | 2.2 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSW（11/10） | C/ESE（16/15） | C/SSE（14/10） | ENE（24） | C/SSE（16/12） | C/SSW（13/10） | WSW（12） | C/SSW（17/10） |
| | 冬季风向及频率 | C/E（17/10） | C/E（16/15） | C/E（18/11） | ENE（35） | C/SE（21/9） | C/NNE（11/9） | NNW（17） | C/N（22/9） |
| 最大冻土深度（cm） | | 8 | 9 | 11 | 13 | 10 | 18 | | 11 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1022.3 | 1024.3 | 1024.0 | 1023.3 | 1019.3 | 1021.9 | 817.4 | 1022.9 |
| | 夏季大气压力 | 1001.2 | 1003.1 | 1002.6 | 1002.3 | 998.2 | 1000.4 | 814.3 | 1001.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 64 | 68 | 83 | 48 | 64 | 93 | 148 | 67 |
| | ≤5℃的起止日期 | 12.11～02.12 | 12.15～02.14 | 12.07～02.27 | 12.25～02.10 | 11.11～02.12 | 11.30～03.02 | 11.09～04.15 | 12.10～02.14 |
| | ≤8℃的天数 | 103 | 104 | 111 | 92 | 103 | 121 | 177 | 110 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.24～03.06 | 12.02～03.15 | 11.23～03.13 | 12.03～03.04 | 11.24～03.06 | 11.15～03.15 | 10.24～04.18 | 11.24～03.13 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 30.1 | 30.5 | 40.3 | 39.5 | 40.6 | 41.3 | 27.6 | 38.7 |
| | 极端最低温度 | −13.5 | −10.1 | −13.0 | −9.0 | −13.6 | −17.5 | −22.7 | −13.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 安徽（12） | | | | 福建（13） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 泉阳 | 宿州 | 巢湖 | 宣城 | 福州 | 厦门 | 漳州 | 三明 |
| 海拔（m） | | 30.6 | 25.9 | 22.4 | 89.4 | 84.0 | 139.4 | 28.9 | 342.9 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 15.3 | 14.7 | 16.0 | 15.5 | 19.8 | 20.6 | 21.3 | 17.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | −2.5 | −3.5 | −1.2 | −1.5 | 6.3 | 8.3 | 8.9 | 1.3 |
| | 冬季空调计算温度 | −5.2 | −5.6 | −3.8 | −4.1 | 4.4 | 6.6 | 7.1 | −1.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 2.8 | 2.2 | 3.5 | 3.4 | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 3.8 | 3.8 | 4.5 | 4.5 | — | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.2 | 35.0 | 35.3 | 36.1 | 35.9 | 33.5 | 35.2 | 34.6 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.1 | 27.8 | 28.4 | 27.4 | 28.0 | 27.5 | 27.6 | 26.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.4 | 30.7 | 32.1 | 30.8 | 30.8 | 29.7 | 30.8 | 28.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 71 | 65 | 75 | 79 | 74 | 79 | 76 | 86 |
| | 夏季通风相对湿度 | 67 | 66 | 68 | 68 | 61 | 71 | 63 | 60 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 1.9 | 3.0 | 3.1 | 1.7 | 1.0 |
| | 冬季平均风速 | 2.5 | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 2.4 | 3.3 | 1.6 | 0.9 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（11/10） | ESE（11） | C/E（21/13） | C/SSW（28/10） | SSE（24） | SSE（10） | C/SE（31/10） | C/CWSW（59/6） |
| | 冬季风向及频率 | C/SSE（10/9） | ESE（14） | C/E（22/16） | C/N（35/13） | C/NNW（17/23） | ESE（23） | C/SE（34/18） | C/CWSW（59/14） |
| 最大冻土深度（cm） | | 13 | 14 | 9 | 11 | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1022.5 | 1023.9 | 1023.8 | 1015.7 | 1012.9 | 1006.5 | 1018.1 | 982.4 |
| | 夏季大气压力 | 1000.8 | 1002.3 | 1002.5 | 995.8 | 996.6 | 994.5 | 1003.0 | 967.3 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 71 | 93 | 59 | 55 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 12.06～02.14 | 12.01～03.03 | 12.16～02.12 | 12.10～02.12 | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 111 | 121 | 101 | 104 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.22～03.12 | 11.16～03.16 | 11.26～03.06 | 11.24～03.07 | — | — | — | — |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.8 | 40.9 | 39.1 | 41.1 | 39.9 | 38.5 | 38.6 | 38.9 |
| | 极端最低温度 | −14.9 | −18.7 | −13.2 | −15.9 | −1.7 | 1.0 | −0.1 | −10.6 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 福建（13） | | | | 江西（14） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 南平 | 龙岩 | 宁德 | 南昌 | 景德镇 | 九江 | 上饶 | 赣州 |
| 海拔（m） | | 125.6 | 342.3 | 869.5 | 46.7 | 61.5 | 36.1 | 116.3 | 123.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 19.5 | 20 | 15.1 | 17.6 | 17.4 | 17.0 | 17.5 | 19.4 |
| | 冬季采暖计算温度 | 4.5 | 6.2 | 0.7 | 0.7 | 1.0 | 0.4 | 1.1 | 2.7 |
| | 冬季空调计算温度 | 2.1 | 3.7 | −1.7 | −1.5 | −1.4 | −2.3 | −1.2 | 0.5 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | 4.7 | 4.8 | 4.6 | 4.9 | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | 6.5 | 6.2 | 6.1 | 5.5 | 6.3 | 7.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 36.1 | 34.6 | 30.9 | 35.5 | 36.0 | 35.8 | 36.1 | 35.4 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.1 | 25.5 | 23.8 | 28.2 | 27.7 | 27.8 | 27.4 | 27.0 |
| | 夏季空调日平均温度 | 30.7 | 29.4 | 25.9 | 32.1 | 31.5 | 32.5 | 31.6 | 31.7 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 78 | 73 | 82 | 77 | 78 | 77 | 80 | 77 |
| | 夏季通风相对湿度 | 55 | 55 | 63 | 68 | 62 | 64 | 60 | 57 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.1 | 1.6 | 1.9 | 2.2 | 2.1 | 2.3 | 2.0 | 1.8 |
| | 冬季平均风速 | 1.0 | 1.5 | 1.4 | 2.6 | 1.9 | 2.7 | 2.4 | 1.6 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（39/7） | C/SSW（32/12） | C/WSW（36/10） | C/WSW（21/11） | C/NE（18/13） | C/ENE（17/12） | ENE（23） | C/SW（23/15） |
| | 冬季风向及频率 | C/SSE（42/10） | C/NE（41/15） | CNE（42/10） | NE（25） | C/NE（20/17） | ENE（20） | ENE（293） | C/NNE（29/28） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | 8 | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1008.0 | 981.1 | 921.7 | 1019.5 | 1017.9 | 1021.7 | 1011.4 | 1008.7 |
| | 夏季大气压力 | 991.5 | 968.1 | 911.6 | 999.5 | 998.5 | 1000.7 | 992.9 | 991.2 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 26 | 25 | 46 | 8 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | 01.11～02.05 | 01.11～0.2.04 | 12.24～02.10 | 01.12～01.19 | — |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 87 | 66 | 68 | 89 | 67 | 12 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | 12.08～03.04 | 12.10～02.13 | 12.08～02.13 | 12.07～03.05 | 12.10～02.14 | 01.11～01.22 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.4 | 39.0 | 35.0 | 40.1 | 40.4 | 40.3 | 40.7 | 40.0 |
| | 极端最低温度 | −5.1 | −3.0 | −9.7 | −9.7 | −9.6 | −7.0 | −9.5 | −3.8 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 江西（14） | | | | 山东（15） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 吉安 | 宜春 | 抚州 | 鹰潭 | 济南 | 青岛 | 淄博 | 烟台 |
| 海拔（m） | | 76.4 | 131.3 | 143.8 | 51.2 | 51.6 | 76.0 | 34.0 | 46.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 18.4 | 17.2 | 18.2 | 18.3 | 14.7 | 12.7 | 13.2 | 12.7 |
| | 冬季采暖计算温度 | 1.7 | 1.0 | 1.6 | 1.8 | –5.3 | –5.0 | –7.4 | –5.8 |
| | 冬季空调计算温度 | –0.5 | –0.8 | –0.6 | –0.6 | –7.7 | –7.2 | –10.3 | –8.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | 4.8 | — | — | 1.4 | 1.3 | 0.0 | 0.7 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 6.7 | 6.2 | 6.8 | 6.6 | 2.1 | 2.6 | 1.3 | 1.9 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.9 | 35.4 | 35.7 | 36.4 | 34.7 | 29.4 | 34.6 | 31.1 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.6 | 27.4 | 27.1 | 27.6 | 26.8 | 26.0 | 26.7 | 25.4 |
| | 夏季空调日平均温度 | 32 | 30.8 | 30.9 | 32.7 | 31.3 | 27.3 | 30.0 | 28.0 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 81 | 81 | 81 | 78 | 53 | 63 | 61 | 59 |
| | 夏季通风相对湿度 | 58 | 63 | 56 | 58 | 61 | 73 | 62 | 75 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.4 | 1.8 | 1.6 | 1.9 | 2.8 | 4.6 | 2.4 | 3.1 |
| | 冬季平均风速 | 2.0 | 1.9 | 1.6 | 1.8 | 2.9 | 5.4 | 2.7 | 4.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | SSW（21） | C/WNW（18/16） | C/SW（27/17） | C /ESE（21/16） | SW（14） | S（17） | SW（17） | C/SW（18/12） |
| | 冬季风向及频率 | NNE（28） | C/WNW（18/16） | C/NE（29/25） | C/ESE（25/17） | E（16） | N（23） | SW（15） | N（20） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | 35 | — | 46 | 46 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1015.4 | 1009.4 | 1006.7 | 1018.7 | 1019.1 | 1017.4 | 1023.7 | 1021.1 |
| | 夏季大气压力 | 996.3 | 990.4 | 989.2 | 999.3 | 997.9 | 1000.4 | 1001.4 | 1001.2 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 9 | 0 | 0 | 99 | 108 | 113 | 112 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | 01.12～01.20 | — | — | 11.22～03.08 | 11.28～03.15 | 11.18～03.10 | 11.26～03.17 |
| | ≤8℃的天数 | 53 | 66 | 54 | 56 | 122 | 141 | 140 | 140 |
| | ≤8℃的起止日期 | 12.21～02.11 | 12.10～02.13 | 12.20～02.11 | 12.19～02.12 | 11.13～03.14 | 11.15～04.04 | 11.08～03.27 | 11.15～04.03 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.3 | 39.6 | 40.0 | 40.4 | 40.5 | 37.4 | 40.7 | 38.0 |
| | 极端最低温度 | –0.8 | –8.5 | –9.3 | –9.3 | –14.0 | –14.3 | –23.0 | –12.8 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 山东（15） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 潍坊 | 临沂 | 德州 | 菏泽 | 日照 | 威海 | 济宁 | 泰安 |
| 海拔（m） | | 22.2 | 87.9 | 21.2 | 49.7 | 16.1 | 65.4 | 51.7 | 128.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 12.5 | 13.5 | 13.2 | 13.8 | 13.0 | 12.5 | 13.6 | 12.8 |
| | 冬季采暖计算温度 | −7.0 | −4.7 | −6.5 | −4.9 | −4.4 | −5.4 | −5.5 | −6.7 |
| | 冬季空调计算温度 | −9.3 | −6.8 | −9.1 | −7.2 | −6.5 | −7.7 | −7.6 | −9.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −0.3 | 1.0 | 0 | 0.9 | 1.4 | 1.2 | 0.6 | 0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 0.8 | 2.3 | 1.3 | 2.2 | 2.4 | 2.1 | 2.1 | 1.3 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 34.2 | 33.2 | 34.2 | 34.4 | 30.0 | 30.2 | 34.1 | 33.1 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 26.9 | 27.2 | 26.9 | 27.4 | 26.8 | 25.7 | 27.4 | 26.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 29.0 | 29.2 | 29.7 | 29.9 | 28.1 | 27.5 | 29.7 | 28.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 63 | 62 | 60 | 68 | 61 | 61 | 68 | 60 |
| | 夏季通风相对湿度 | 63 | 68 | 63 | 66 | 75 | 75 | 65 | 66 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.4 | 2.7 | 2.2 | 1.8 | 3.1 | 4.2 | 2.4 | 2.0 |
| | 冬季平均风速 | 3.5 | 2.8 | 2.1 | 2.2 | 3.4 | 5.4 | 2.5 | 2.7 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | S（19） | ESE（12） | C/SSW（19/12） | C/SSW（26/10） | S（9） | SSW（15） | SSW（14） | C/ENE（25/12） |
| | 冬季风向及频率 | SSW（13） | NE（14） | C/ENE（20/10） | C/NNE（20/12） | N（14） | N（21） | C/S（10/9） | C/E（21/18） |
| 最大冻土深度（cm） | | 50 | 40 | 46 | 21 | 25 | 47 | 48 | 31 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1022.1 | 1017.0 | 1025.5 | 1021.5 | 1024.8 | 1020.9 | 1020.8 | 1011.2 |
| | 夏季大气压力 | 1000.9 | 996.4 | 1002.8 | 999.4 | 1006.6 | 1001.8 | 999.4 | 990.5 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 118 | 103 | 114 | 105 | 108 | 116 | 104 | 113 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.16～03.13 | 11.24～03.06 | 11.17～03.10 | 11.02～03.06 | 11.27～03.14 | 11.26～03.21 | 11.22～03.05 | 11.19～03.11 |
| | ≤8℃的天数 | 141 | 135 | 141 | 130 | 136 | 141 | 137 | 140 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.08～03.28 | 11.13～03.27 | 11.07～03.27 | 11.09～03.18 | 11.15～03.30 | 11.14～04.03 | 11.10～03.26 | 11.08～03.27 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.7 | 38.4 | 39.4 | 40.5 | 38.3 | 38.4 | 39.9 | 38.1 |
| | 极端最低温度 | −17.9 | −14.3 | −20.1 | −16.5 | −13.8 | −13.2 | −19.3 | −20.7 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 山东（15） | | 河南（16） | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 滨州 | 东营 | 郑州 | 开封 | 洛阳 | 新乡 | 安阳 | 三门峡 |
| 海拔（m） | | 11.7 | 6.0 | 110.4 | 72.5 | 137.1 | 72.7 | 75.5 | 499.9 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 12.6 | 13.1 | 14.3 | 14.2 | 14.7 | 14.2 | 14.1 | 13.9 |
| | 冬季采暖计算温度 | −7.6 | −6.6 | −3.8 | −3.9 | −3.0 | −3.9 | −4.7 | −3.8 |
| | 冬季空调计算温度 | −10.2 | −9.2 | −6.0 | −6.0 | −6.1 | −5.8 | −7.0 | −6.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −0.5 | 0.0 | 1.7 | 1.7 | 2.1 | 1.5 | 1.0 | 1.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 0.6 | 1.1 | 3.0 | 2.8 | 3.0 | 2.6 | 2.2 | 2.6 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 34.0 | 34.2 | 34.9 | 34.4 | 35.4 | 34.4 | 34.7 | 34.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.2 | 26.8 | 27.4 | 27.6 | 26.9 | 27.6 | 27.3 | 25.7 |
| | 夏季空调日平均温度 | 29.4 | 29.8 | 30.2 | 30.0 | 30.5 | 29.8 | 30.2 | 30.1 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 62 | 62 | 61 | 63 | 59 | 61 | 60 | 55 |
| | 夏季通风相对湿度 | 64 | 64 | 64 | 66 | 63 | 65 | 63 | 59 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.7 | 3.6 | 2.2 | 2.6 | 1.6 | 1.9 | 2.0 | 2.5 |
| | 冬季平均风速 | 3.0 | 3.4 | 2.7 | 2.9 | 2.1 | 2.1 | 1.9 | 2.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | ESE（20） | S（18） | C/S（22/12） | C/SSW（12/11） | C/E（31/9） | C/E（25/13） | C/SSW（28/16） | ESE（23） |
| | 冬季风向及频率 | WSW（10） | NW（10） | C/NW（22/12） | NE（16） | C/WNW（30/11） | C/E（28/14） | C/SSW（32/11） | C/ESE（25/14） |
| 最大冻土深度（cm） | | 50 | 47 | 47 | 46 | 49 | 49 | 47 | 48 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1026.0 | 1026.6 | 1013.3 | 1018.2 | 1009.0 | 1017.9 | 1017.9 | 927.6 |
| | 夏季大气压力 | 1003.9 | 1004.9 | 992.3 | 996.8 | 988.2 | 996.6 | 996.6 | 959.3 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 120 | 115 | 97 | 99 | 92 | 99 | 101 | 99 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.14～03.13 | 11.19～03.13 | 11.26～03.02 | 11.25～03.03 | 12.01～03.02 | 11.24～03.02 | 11.23～03.03 | 11.24～03.02 |
| | ≤8℃的天数 | 142 | 140 | 125 | 125 | 118 | 124 | 126 | 128 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.06～03.27 | 11.09～03.28 | 11.12～03.16 | 11.12～03.16 | 11.17～03.14 | 11.12～03.15 | 11.10～03.15 | 11.09～03.16 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.8 | 40.7 | 42.3 | 42.5 | 41.7 | 42.0 | 41.5 | 40.2 |
| | 极端最低温度 | −21.4 | −20.2 | −17.9 | −16.0 | −15.0 | −19.2 | −17.3 | −12.8 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 河南（16） | | | | | | 湖北（17） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 南阳 | 商丘 | 信阳 | 许昌 | 驻马店 | 周口 | 武汉 | 黄石 |
| 海拔（m） | | 129.2 | 50.1 | 114.5 | 66.8 | 82.7 | 52.6 | 23.1 | 19.6 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 14.9 | 14.1 | 15.3 | 14.5 | 14.9 | 14.4 | 16.6 | 17.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | −2.1 | −4.0 | −2.1 | −3.2 | −2.9 | −3.2 | −0.3 | 0.7 |
| | 冬季空调计算温度 | −4.5 | −6.3 | −4.6 | −5.5 | −5.5 | −5.7 | −2.6 | −1.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 2.6 | 1.6 | 3.1 | 2.2 | 2.5 | 2.1 | 3.9 | 4.5 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 3.8 | 2.8 | 4.2 | 3.3 | 3.5 | 3.3 | 5.2 | 5.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 34.3 | 34.6 | 34.5 | 35.1 | 35.0 | 35.0 | 35.2 | 35.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.8 | 27.9 | 27.6 | 27.9 | 27.1 | 28.1 | 28.4 | 28.3 |
| | 夏季空调日平均温度 | 30.1 | 30.2 | 30.9 | 30.3 | 30.7 | 30.2 | 32.0 | 32.5 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 70 | 69 | 77 | 64 | 69 | 68 | 77 | 79 |
| | 夏季通风相对湿度 | 69 | 67 | 68 | 66 | 67 | 67 | 67 | 65 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.0 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.2 | 2.0 | 2.0 | 2.2 |
| | 冬季平均风速 | 2.1 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 1.8 | 2.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ENE（21/14） | C/S（14/10） | C/SSW（19/10） | C/NE（21/9） | C/SSW（21/10） | C/SSW（20/8） | C/ENE（23/8） | C/ESE（19/16） |
| | 冬季风向及频率 | C/ENE（26/18） | C/N（13/10） | C/NNE（25/14） | C/NE（22/13） | C/N（15/11） | C/NNE（17/11） | C/NE（28/13） | C/NW（28/11） |
| 最大冻土深度（cm） | | 10 | 18 | — | 15 | 14 | 12 | 9 | 7 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1011.2 | 1020.8 | 1014.3 | 1018.6 | 1016.7 | 1020.6 | 1023.5 | 1023.4 |
| | 夏季大气压力 | 990.4 | 999.4 | 993.4 | 997.2 | 995.4 | 999.9 | 1002.1 | 1002.5 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 86 | 99 | 64 | 95 | 87 | 91 | 50 | 38 |
| | ≤5℃的起止日期 | 12.04～02.27 | 11.25～03.03 | 12.11～02.12 | 11.28～03.02 | 12.04～02.28 | 11.27～03.02 | 12.22～02.09 | 01.01～02.07 |
| | ≤8℃的天数 | 116 | 125 | 105 | 122 | 115 | 123 | 98 | 88 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.19～03.14 | 11.13～03.17 | 11.23～03.07 | 11.14～03.15 | 11.21～03.15 | 11.13～03. 15 | 11.27～03.04 | 12.06～03.03 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 41.4 | 41.3 | 40.0 | 41.9 | 40.6 | 41.9 | 39.3 | 40.2 |
| | 极端最低温度 | −17.5 | −15.4 | −16.6 | −19.6 | −18.1 | −17.4 | −18.1 | −10.5 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 湖北（17） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 宜昌 | 恩施 | 荆州 | 襄樊 | 荆门 | 十堰 | 黄冈 | 咸宁 |
| 海拔（m） | | 133.1 | 457.1 | 32.6 | 125.5 | 65.8 | 426.9 | 59.3 | 36.0 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 16.8 | 16.2 | 16.5 | 15.6 | 16.1 | 14.3 | 16.3 | 17.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | 0.9 | 2.0 | 0.3 | −1.5 | −0.5 | −1.5 | −0.4 | 0.3 |
| | 冬季空调计算温度 | −1.1 | 0.4 | −1.9 | −3.2 | −2.4 | −3.4 | −2.5 | −2.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 4.7 | 4.8 | 4.2 | 3.1 | 3.8 | 2.9 | 3.7 | 4.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 5.9 | 6.0 | 5.4 | 4.2 | 4.9 | 4.1 | 5.0 | 5.6 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.5 | 34.3 | 34.7 | 34.7 | 35.5 | 35.4 | 35.5 | 35.7 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.8 | 26.0 | 28.5 | 27.6 | 28.2 | 26.3 | 28.0 | 28.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.1 | 29.6 | 31.1 | 31.0 | 31.0 | 28.9 | 31.6 | 32.4 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 74 | 84 | 77 | 71 | 74 | 71 | 74 | 79 |
| | 夏季通风相对湿度 | 66 | 57 | 70 | 66 | 70 | 63 | 65 | 65 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.5 | 0.7 | 2.3 | 2.4 | 3.0 | 1.0 | 2.0 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 1.3 | 0.5 | 2.1 | 2.3 | 3.1 | 1.1 | 2.1 | 2.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（31/11） | C/SSW（63/5） | SSW（15） | SSE（15） | N（19） | C/ESE（55/15） | C/NNE（25/28） | C/NNE（14/9） |
| | 冬季风向及频率 | C/SSE（36/14） | C/SSW（72/3） | C/NE（22/17） | C/SSE（17/11） | N（26） | C/ESE（60/18） | C/NNE（20/28） | C/NE（18/14） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | 5 | — | 6 | — | 5 | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1010.4 | 970.3 | 1022.4 | 1011.4 | 1018.7 | 974.1 | 1019.5 | 1022.1 |
| | 夏季大气压力 | 990.0 | 954.6 | 1000.9 | 990.8 | 997.5 | 956.8 | 998.8 | 1000.9 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 28 | 13 | 44 | 64 | 54 | 72 | 54 | 37 |
| | ≤5℃的起止日期 | 01.09～02.05 | 01.11～01.23 | 12.27～02.08 | 12.11～02.12 | 12.18～02.09 | 12.05～02.14 | 12.19～02.10 | 01.02～02.07 |
| | ≤8℃的天数 | 85 | 90 | 91 | 102 | 90 | 121 | 100 | 87 |
| | ≤8℃的起止日期 | 12.08～03.02 | 12.04～03.03 | 12.04～03.04 | 11.25～03.06 | 12.01～03.05 | 11.15～03.15 | 11.26～03.05 | 12.07～03.03 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.4 | 40.3 | 38.6 | 40.7 | 38.6 | 41.4 | 39.8 | 39.4 |
| | 极端最低温度 | −9.8 | −12.3 | −14.9 | −15.1 | −15.3 | −17.6 | −15.3 | −12.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 湖北（17） | 湖南（18） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 随州 | 长沙 | 常德 | 衡阳 | 邵阳 | 岳阳 | 郴州 | 张家界 |
| 海拔（m） | | 93.3 | 44.9 | 35.0 | 304.7 | 248.6 | 53.0 | 184.9 | 322.2 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 15.8 | 17.0 | 16.9 | 18.0 | 17.1 | 17.2 | 18.0 | 16.2 |
| | 冬季采暖计算温度 | –1.1 | 0.3 | 0.6 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | 1.0 | 1.0 |
| | 冬季空调计算温度 | –3.5 | –1.9 | –1.6 | –0.9 | –1.2 | –2.0 | –1.1 | 0.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 3.3 | 4.3 | 4.5 | — | 4.7 | 4.5 | — | 4.5 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 4.3 | 5.5 | 5.8 | 6.4 | 6.1 | 5.9 | 6.5 | 4.8 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 34.9 | 35.8 | 35.4 | 36.0 | 34.8 | 34.1 | 35.6 | 34.7 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.0 | 27.7 | 29.6 | 27.7 | 26.8 | 28.3 | 26.7 | 26.9 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.1 | 31.6 | 32.0 | 32.4 | 30.9 | 32.2 | 31.7 | 30.0 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 71 | 83 | 80 | 81 | 80 | 78 | 84 | 78 |
| | 夏季通风相对湿度 | 67 | 61 | 66 | 58 | 62 | 72 | 55 | 66 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.2 | 2.6 | 1.9 | 2.1 | 1.7 | 2.8 | 1.6 | 1.2 |
| | 冬季平均风速 | 2.2 | 2.3 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 2.6 | 1.2 | 1.2 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（21/11） | C/NNW（16/13） | C/NE（23/8） | C/SSW（16/13） | C/S（27/8） | S（11） | C/SSW（39/14） | C/ENE（32/15） |
| | 冬季风向及频率 | C/NNE（26/15） | NNW（32） | C/NE（33/15） | C/ENE（28/20） | C/ESE（32/18） | ENE（20） | C/NNE（45/19） | C/ENE（52/15） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | 5 | 2 | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1015.0 | 1019.6 | 1022.3 | 1012.6 | 995.1 | 1019.5 | 1002.2 | 987.3 |
| | 夏季大气压力 | 994.1 | 999.2 | 1000.8 | 993.0 | 976.9 | 998.7 | 984.3 | 969.2 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 63 | 48 | 30 | 0 | 11 | 27 | 0 | 30 |
| | ≤5℃的起止日期 | 12.11～02.11 | 12.26～02.11 | 01.08～02.06 | — | 01.12～01.22 | 01.10～02.05 | — | 01.08～02.06 |
| | ≤8℃的天数 | 102 | 88 | 86 | 56 | 67 | 68 | 55 | 88 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.25～03.06 | 12.06～03.03 | 12.08～03.03 | 12.19～02.12 | 12.10～02.14 | 12.09～02.14 | 12.19～02.11 | 12.07～03.04 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.8 | 39.7 | 40.1 | 40.0 | 39.5 | 39.3 | 40.5 | 40.7 |
| | 极端最低温度 | –16.0 | –11.3 | –13.2 | –7.9 | –10.5 | –11.4 | –6.8 | –10.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 湖南（18） | | | | | 广东（19） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 益阳 | 永州 | 怀化 | 娄底 | 湘西州 | 广州 | 湛江 | 汕头 |
| 海拔（m） | | 36.9 | 172.6 | 272.2 | 100.0 | 208.1 | 41.7 | 25.3 | 1.1 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 17.0 | 17.8 | 16.5 | 17.0 | 16.6 | 22.0 | 23.3 | 21.5 |
| | 冬季采暖计算温度 | 0.6 | 1.6 | 0.8 | 0.6 | 1.3 | 8.0 | 10.0 | 9.4 |
| | 冬季空调计算温度 | −1.6 | −1.0 | −1.1 | −1.6 | −0.6 | 5.2 | 7.5 | 7.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 4.5 | — | 4.7 | 4.6 | 4.8 | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 5.8 | 6.6 | 5.9 | 5.9 | 6.1 | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.1 | 34.9 | 34.0 | 35.6 | 34.8 | 34.2 | 33.9 | 33.2 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.4 | 26.9 | 26.8 | 27.5 | 27.0 | 27.8 | 28.1 | 27.7 |
| | 夏季空调日平均温度 | 32.0 | 31.3 | 29.7 | 31.5 | 30.0 | 30.7 | 30.8 | 30.9 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 81 | 81 | 80 | 82 | 79 | 72 | 81 | 78 |
| | 夏季通风相对湿度 | 67 | 60 | 66 | 60 | 64 | 68 | 70 | 72 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.7 | 3.0 | 1.3 | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 2.6 | 2.6 |
| | 冬季平均风速 | 2.4 | 3.1 | 1.6 | 1.7 | 0.9 | 1.7 | 2.6 | 2.7 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | S（14） | SSW（19） | C/ENE（44/10） | C/NE（31/11） | C/NE（44/10） | C/SSE（28/12） | SSE（15） | C/WSW（18/10） |
| | 冬季风向及频率 | NNE（22） | NE（26） | C/ENE（40/24） | C/ENE（39/21） | C/ENE（49/10） | C/NNE（34/19） | ESE（17） | E（24） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1021.5 | 1012.6 | 991.9 | 1013.2 | 1000.5 | 1019.0 | 1015.5 | 1020.2 |
| | 夏季大气压力 | 1000.4 | 993.0 | 974.0 | 993.4 | 981.3 | 1004.0 | 1001.3 | 1005.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 29 | 0 | 29 | 30 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 01.09～02.06 | — | 01.08～02.05 | 01.08～02.06 | 01.10～01.20 | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 85 | 56 | 69 | 87 | 68 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤8℃的起止日期 | 12.09～03.08 | 12.19～02.12 | 12.08～02.14 | 12.07～03.03 | 12.09～02.14 | — | — | — |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 38.9 | 39.7 | 39.1 | 39.7 | 40.2 | 38.1 | 38.1 | 38.6 |
| | 极端最低温度 | −11.2 | −7.0 | −11.5 | −11.7 | −7.5 | 0.0 | 2.8 | 0.3 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 广东（19） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 韶关 | 阳江 | 深圳 | 江门 | 茂名 | 肇庆 | 惠州 | 梅州 |
| 海拔（m） | | 60.7 | 23.3 | 18.2 | 32.7 | 84.6 | 41.0 | 22.4 | 87.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 20.4 | 22.5 | 22.0 | 22.0 | 22.5 | 22.3 | 21.9 | 21.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | 5.0 | 9.4 | 9.2 | 8.0 | 8.5 | 8.4 | 8.0 | 6.7 |
| | 冬季空调计算温度 | 2.5 | 6.8 | 6.0 | 5.2 | 6.0 | 6.0 | 4.8 | 4.3 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.4 | 33.0 | 33.7 | 33.6 | 34.3 | 34.6 | 34.1 | 35.1 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.3 | 27.8 | 27.5 | 27.6 | 27.7 | 27.8 | 27.6 | 27.2 |
| | 夏季空调日平均温度 | 31.2 | 29.9 | 30.5 | 29.9 | 30.1 | 31.1 | 30.4 | 30.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 75 | 74 | 72 | 75 | 74 | 68 | 71 | 77 |
| | 夏季通风相对湿度 | 60 | 74 | 70 | 71 | 66 | 74 | 69 | 60 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.6 | 2.6 | 2.2 | 2.0 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.2 |
| | 冬季平均风速 | 1.5 | 2.9 | 2.8 | 2.6 | 2.9 | 1.7 | 2.7 | 1.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSW（41/17） | SSW（13） | C/ESE（21/11） | SSW（23） | C/SW（41/12） | C/SE（27/12） | C/SSE（26/14） | C/SW（36/8） |
| | 冬季风向及频率 | C/NNW（46/11） | ENE（34） | ENE（29） | NE（30） | NE（26） | C/ENE（28/27） | NE（29） | C/NNE（46/9） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1014.5 | 1016.9 | 1016.6 | 1016.3 | 1009.3 | 1019.0 | 1017.9 | 1011.3 |
| | 夏季大气压力 | 997.6 | 1002.6 | 1002.4 | 1001.8 | 995.2 | 1003.7 | 1003.2 | 996.3 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 40.3 | 37.5 | 38.7 | 37.3 | 37.8 | 38.7 | 38.2 | 39.5 |
| | 极端最低温度 | –4.3 | 2.2 | 1.7 | 1.6 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | –3.3 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 广东（19） | | | | 广西（20） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 汕尾 | 河源 | 清远 | 揭阳 | 南宁 | 柳州 | 桂林 | 梧州 |
| 海拔（m） | | 17.3 | 40.6 | 98.3 | 12.9 | 73.1 | 96.8 | 164.4 | 114.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 22.2 | 21.5 | 19.6 | 21.9 | 21.8 | 20.7 | 18.9 | 21.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | 10.3 | 6.9 | 4.0 | 10.3 | 7.6 | 5.1 | 3.0 | 6.0 |
| | 冬季空调计算温度 | 7.3 | 3.9 | 1.8 | 8.0 | 5.7 | 3.0 | 1.1 | 3.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.7 | 34.5 | 35.1 | 32.8 | 34.5 | 34.8 | 34.2 | 34.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 27.8 | 27.5 | 27.4 | 27.6 | 27.9 | 27.5 | 27.3 | 27.9 |
| | 夏季空调日平均温度 | 29.6 | 30.4 | 30.6 | 29.6 | 30.7 | 31.4 | 30.4 | 30.5 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 73 | 70 | 77 | 74 | 78 | 75 | 74 | 76 |
| | 夏季通风相对湿度 | 77 | 65 | 61 | 74 | 68 | 65 | 65 | 65 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.2 | 1.3 | 1.2 | 2.3 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.2 |
| | 冬季平均风速 | 3.0 | 1.5 | 1.3 | 2.9 | 1.2 | 1.5 | 3.2 | 1.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | WSW（19） | C/SSW（37/17） | C/SSW（46/8） | C/SSW（22/10） | C/S（31/10） | C/SSW（34/15） | C/NE（32/16） | C/ESE（32/10） |
| | 冬季风向及频率 | ENE（19） | C/NNE（32/24） | C/NNE（47/16） | ENE（28） | C/E（43/12） | C/N（27/19） | NE（48） | C/NE（24/16） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1019.3 | 1016.3 | 1011.1 | 1018.7 | 1011.0 | 1009.0 | 1093.0 | 1006.9 |
| | 夏季大气压力 | 1005.3 | 100.9 | 993.8 | 1004.6 | 995.5 | 993.2 | 986.1 | 991.6 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | 01.10～02.06 | — |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 38.5 | 39.0 | 39.6 | 38.4 | 39.0 | 39.1 | 38.5 | 39.7 |
| | 极端最低温度 | 2.1 | –0.7 | –3.4 | 1.5 | –1.9 | –1.3 | –3.6 | –1.5 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 广西（20） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 北海 | 百色 | 钦州 | 玉林 | 防城港 | 河池 | 来宾 | 贺州 |
| 海拔（m） | | 12.8 | 173.5 | 4.5 | 81.8 | 22.1 | 211.0 | 84.9 | 108.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 22.0 | 22.0 | 22.2 | 21.8 | 22.6 | 20.5 | 20.8 | 19.9 |
| | 冬季采暖计算温度 | 8.2 | 8.8 | 7.9 | 7.1 | 10.5 | 6.3 | 5.5 | 4.0 |
| | 冬季空调计算温度 | 6.2 | 7.1 | 5.3 | 5.1 | 8.6 | 4.3 | 3.6 | 1.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 33.1 | 36.1 | 33.6 | 34.0 | 33.5 | 34.6 | 34.6 | 35.0 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.2 | 27.9 | 28.3 | 27.8 | 28.5 | 27.1 | 27.7 | 27.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 30.6 | 31.3 | 30.3 | 30.3 | 29.9 | 30.7 | 30.8 | 30.8 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 79 | 76 | 77 | 79 | 81 | 75 | 75 | 78 |
| | 夏季通风相对湿度 | 74 | 65 | 75 | 68 | 77 | 66 | 66 | 62 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.0 | 1.3 | 2.4 | 1.4 | 2.1 | 1.2 | 1.8 | 1.7 |
| | 冬季平均风速 | 3.8 | 1.2 | 2.7 | 1.7 | 1.7 | 1.1 | 2.4 | 1.5 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | SSW（14） | C/SSE（26/8） | SSW（20） | C/SSE（30/11） | C/SSW（24/11） | C/ESE（39/26） | C/SSE（30/13） | C/ESE（22/19） |
| | 冬季风向及频率 | NNE（37） | C/S（43/9） | NNE（33） | C/N（30/21） | C/ENE（24/15） | C/ESE（43/16） | NE（25） | C/NW（31/21） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1017.3 | 998.8 | 1019.9 | 1019.9 | 1016.2 | 995.9 | 1010.8 | 1009.0 |
| | 夏季大气压力 | 1002.5 | 983.6 | 1003.5 | 995.0 | 1001.4 | 980.1 | 994.4 | 992.4 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 37.1 | 42.2 | 37.5 | 38.4 | 38.1 | 38.4 | 39.6 | 39.5 |
| | 极端最低温度 | 2.0 | 0.1 | 2.0 | 0.8 | 3.3 | 0.0 | −1.6 | −3.5 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 广西（20） | 海南（2） | | 重庆（3） | | | 四川（16） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 崇左 | 海口 | 三亚 | 重庆 | 万州 | 奉节 | 成都 | 广元 |
| 海拔（m） | | 128.8 | 13.9 | 5.9 | 351.1 | 186.7 | 607.3 | 506.1 | 492.4 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 22.2 | 24.1 | 25.8 | 17.7 | 18.0 | 16.3 | 16.1 | 16.1 |
| | 冬季采暖计算温度 | 9.0 | 12.6 | 17.9 | 4.1 | 4.3 | 1.8 | 2.7 | 3.2 |
| | 冬季空调计算温度 | 7.3 | 10.3 | 15.8 | 2.2 | 2.9 | 0.0 | 1.0 | 0.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | 4.8 | — | 4.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | — | 7.2 | 7.2 | 6.0 | 6.2 | 6.1 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.0 | 35.1 | 32.8 | 35.5 | 36.5 | 34.3 | 31.8 | 33.3 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 28.1 | 28.1 | 28.1 | 26.5 | 27.9 | 25.4 | 26.4 | 25.8 |
| | 夏季空调日平均温度 | 30.9 | 30.5 | 30.2 | 32.3 | 31.4 | 30.9 | 27.9 | 28.8 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 79 | 86 | 73 | 83 | 85 | 71 | 83 | 64 |
| | 夏季通风相对湿度 | 68 | 68 | 73 | 59 | 56 | 57 | 73 | 64 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.0 | 2.3 | 2.2 | 1.5 | 0.5 | 3.0 | 1.2 | 1.2 |
| | 冬季平均风速 | 1.2 | 2.5 | 2.7 | 1.1 | 0.4 | 3.1 | 0.9 | 1.3 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ESE（48/6） | S（19） | C/SSE（15/9） | C/ENE（33/8） | C/N（74/5） | C/NNE（22/17） | C/NNE（41/8） | C/SE（42/8） |
| | 冬季风向及频率 | C/ESE（41/16） | ENE（24） | ENE（19） | C/NNE（46/13） | C/NNE（79/5） | C/NNE（29/13） | C/NE（50/13） | C/N（44/10） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 1004.0 | 1016.4 | 1016.2 | 980.6 | 1001.1 | 1018.7 | 963.7 | 965.4 |
| | 夏季大气压力 | 989 | 1002.8 | 1005.6 | 963.8 | 982.3 | 997.5 | 948 | 949.4 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 7 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | 01.12～01.23 | — | 01.13～01.19 |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 53 | 54 | 85 | 69 | 75 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | — | 12.22～02.12 | 12.07～03.01 | 12.07～03.01 | 12.08～02.14 | 12.03～02.15 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.2 | 38.7 | 35.9 | 40.2 | 42.1 | 39.6 | 36.7 | 37.9 |
| | 极端最低温度 | –0.2 | 4.9 | 5.1 | –1.8 | –3.7 | –9.2 | –5.9 | –8.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 四川（23） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 康定 | 宜宾 | 南充 | 西昌 | 遂宁 | 内江 | 乐山 | 泸州 |
| 海拔（m） | | 2615.7 | 340.8 | 309.3 | 1590.9 | 278.2 | 347.1 | 424.2 | 334.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 7.1 | 17.8 | 17.3 | 16.9 | 17.4 | 17.6 | 17.2 | 17.7 |
| | 冬季采暖计算温度 | −6.5 | 4.5 | 3.6 | 4.7 | 3.9 | 4.1 | 3.9 | 4.5 |
| | 冬季空调计算温度 | −8.3 | 2.8 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 0.3 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 1.7 | 7.7 | 6.8 | — | 6.9 | 7.3 | 7.2 | 7.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 22.8 | 33.8 | 35.3 | 30.7 | 34.7 | 34.3 | 32.8 | 34.6 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 16.3 | 27.3 | 27.1 | 21.8 | 27.5 | 27.1 | 26.6 | 27.1 |
| | 夏季空调日平均温度 | 18.1 | 30.0 | 31.4 | 26.6 | 30.7 | 30.8 | 29.0 | 31.0 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 65 | 85 | 85 | 52 | 86 | 83 | 82 | 67 |
| | 夏季通风相对湿度 | 64 | 67 | 61 | 63 | 63 | 66 | 71 | 86 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.9 | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 0.8 | 1.8 | 1.4 | 1.7 |
| | 冬季平均风速 | 3.1 | 0.6 | 0.8 | 1.7 | 0.4 | 1.4 | 11.0 | 1.2 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SW（30/21） | C/NW（55/6） | C/NNE（43/9） | C/NNE（41/9） | C/NNE（58/7） | C/N（25/11） | C/NNE（34/9） | C/WSW（20/10） |
| | 冬季风向及频率 | C/NSE（31/26） | C/ENE（68/6） | C/NNE（56/10） | C/NNE（35/10） | C/NNE（75/5） | C/NNE（30/13） | C/NNE（45/11） | C/NNW（30/9） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 741.6 | 982.4 | 986.7 | 838.5 | 990.0 | 980.9 | 972.7 | 983.0 |
| | 夏季大气压力 | 742.4 | 965.4 | 969.1 | 834.9 | 972.0 | 963.9 | 956.4 | 965.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 155 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.06～03.30 | — | — | — | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 187 | 32 | 62 | 0 | 62 | 50 | 53 | 33 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.11～04.18 | 12.26～01.26 | 12.12～02.11 | — | 12.12～02.11 | 12.22～02.09 | 12.20～02.10 | 12.25～01.26 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 29.4 | 39.5 | 41.2 | 36.6 | 39.5 | 40.1 | 36.8 | 39.6 |
| | 极端最低温度 | −14.1 | −1.7 | −3.4 | −3.8 | −3.8 | −2.7 | −2.9 | −1.9 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 四川（23） | | | | | | 贵州（24） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 绵阳 | 达州 | 雅安 | 巴中 | 资阳 | 阿坝州 | 贵阳 | 遵义 |
| 海拔（m） | | 470.8 | 344.9 | 637.6 | 417.7 | 357.0 | 2264.4 | 1074.3 | 843.9 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 16.2 | 17.1 | 16.2 | 16.9 | 17.2 | 8.6 | 15.3 | 15.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | 2.4 | 3.5 | 2.9 | 3.2 | 3.6 | -4.1 | -0.3 | 0.3 |
| | 冬季空调计算温度 | 0.7 | 2.1 | 1.1 | 1.5 | 1.3 | -6.1 | -2.5 | -1.7 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | 1.2 | 4.6 | 4.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.2 | 6.9 | 2.5 | 6.9 | 5.6 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.6 | 35.4 | 32.1 | 34.5 | 33.7 | 27.3 | 30.1 | 31.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 26.4 | 27.1 | 25.8 | 26.9 | 26.7 | 17.3 | 23.0 | 24.2 |
| | 夏季空调日平均温度 | 28.5 | 31.0 | 27.9 | 30.3 | 29.5 | 19.3 | 26.5 | 27.9 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 79 | 82 | 80 | 82 | 84 | 48 | 80 | 88 |
| | 夏季通风相对湿度 | 70 | 59 | 70 | 59 | 65 | 53 | 64 | 63 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.1 | 1.4 | 1.8 | 0.9 | 1.3 | 1.1 | 2.1 | 1.1 |
| | 冬季平均风速 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 2.1 | 1.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ENE（46/5） | C/ENE（31/27） | C/WSW（29/15） | C/SW（52/5） | C/S（41/7） | C/NW（61/9） | C/SSW（24/17） | C/SSW（48/7） |
| | 冬季风向及频率 | C/E（577） | C/ENE（45/25） | C/E（50/13） | C/E（68/4） | C/ENE（58/7） | C/NW（62/10） | ENE（23） | C/ESE（50/7） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | 25 | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 967.3 | 985.0 | 949.7 | 979.9 | 980.3 | 733.3 | 897.4 | 924.0 |
| | 夏季大气压力 | 951.2 | 967.5 | 935.4 | 962.7 | 962.9 | 724.7 | 887.8 | 911.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 122 | 27 | 35 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | 11.04～03.07 | 01.11～02.06 | 01.05～02.08 |
| | ≤8℃的天数 | 73 | 65 | 64 | 67 | 62 | 162 | 9 | 91 |
| | ≤8℃的起止日期 | 12.05～02.15 | 12.10～02.12 | 12.11～02.15 | 12.09～02.15 | 12.14～02.13 | 10.20～03.30 | 12.05～02.14 | 12.04～04.04 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 37.2 | 41.2 | 35.4 | 40.3 | 39.2 | 34.5 | 35.1 | 37.4 |
| | 极端最低温度 | -7.3 | -4.5 | -3.9 | -5.3 | -4.0 | -16.0 | -7.3 | -7.1 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 贵州（24） | | | | | | | 云南(25) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 毕节 | 安顺 | 铜仁 | 黔西南州 | 黔南州 | 黔东南州 | 六盘水 | 昆明 |
| 海拔（m） | | 1510.6 | 1392.9 | 279.7 | 1378.5 | 440.3 | 720.3 | 1515.2 | 1892.4 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 12.8 | 14.1 | 17.0 | 15.3 | 19.6 | 15.7 | 15.2 | 14.9 |
| | 冬季采暖计算温度 | –1.7 | –1.1 | 1.4 | 0.6 | 5.5 | –0.4 | 0.6 | 3.6 |
| | 冬季空调计算温度 | –3.5 | –3.0 | –0.5 | –1.3 | 3.7 | –2.3 | –1.4 | 0.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 3.4 | 4.2 | 4.9 | — | — | 4.4 | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 4.4 | 5.7 | 6.3 | 6.7 | — | 5.8 | 6.9 | 7.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 29.2 | 27.7 | 35.3 | 28.7 | 34.5 | 32.1 | 29.3 | 26.2 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 21.8 | 21.8 | 26.7 | 22.2 | — | 24.5 | 21.6 | 20.0 |
| | 夏季空调日平均温度 | 24.5 | 24.5 | 30.7 | 24.8 | 29.3 | 28.3 | 24.7 | 22.4 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 87 | 84 | 76 | 84 | 73 | 80 | 79 | 69 |
| | 夏季通风相对湿度 | 64 | 70 | 60 | 69 | 66 | 64 | 65 | 68 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 0.9 | 2.3 | 0.8 | 1.8 | 0.6 | 1.6 | 1.3 | 1.8 |
| | 冬季平均风速 | 0.6 | 2.4 | 0.9 | 2.2 | 0.7 | 1.6 | 2.0 | — |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（60/12） | SSW（25） | C/SSW（62/7） | C/ESE（25/13） | C/ESE（69/4） | C/SSW（33/9） | C/WSW（48/9） | C/WSW（34/13） |
| | 冬季风向及频率 | C/SSE（69/7） | ENE（31） | C/ENE（58/15） | C/ENE（19/18） | C/ESE（62/8） | C/NNE（26/22） | C/ENE（31/19） | C/WSW（34/13） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 850.9 | 863.1 | 991.3 | 864.4 | 968.6 | 938.3 | 849.6 | 811.9 |
| | 夏季大气压力 | 844.2 | 856.0 | 973.1 | 857.5 | 954.7 | 925.2 | 843.8 | 808.2 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 67 | 41 | 5 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | 12.10～02.14 | 01.01～02.10 | 01.29～02.02 | — | — | 01.09～02.07 | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 112 | 99 | 64 | 65 | 0 | 87 | 66 | 27 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.19～03.10 | 11.27～03.05 | 12.12～02.13 | 12.10～02.12 | — | 12.08～03.04 | 12.09～02.12 | 12.17～01.12 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.7 | 33.4 | 40.1 | 35.5 | 39.2 | 37.5 | 35.1 | 30.4 |
| | 极端最低温度 | –11.3 | –7.6 | –9.2 | –6.2 | –2.7 | –9.7 | –7.9 | –7.8 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 云南（25） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 保山 | 昭通 | 丽江 | 普洱 | 红河州 | 西双版纳 | 文山州 | 曲靖 |
| 海拔（m） | | 1653.5 | 1949.5 | 2392.4 | 1302.1 | 1300.7 | 582.0 | 1271.6 | 1898.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 15.9 | 11.5 | 12.7 | 18.4 | 18.2 | 22.4 | 18.0 | 14.4 |
| | 冬季采暖计算温度 | 6.6 | –3.1 | 3.1 | 9.7 | 6.8 | 13.3 | 5.6 | 1.1 |
| | 冬季空调计算温度 | 5.6 | –5.2 | 1.3 | 7.0 | 4.5 | 10.5 | 3.4 | –1.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | 3.1 | — | — | — | — | — | — |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 7.9 | 4.1 | 6.3 | — | — | — | — | — |
| | 夏季空调计算干球温度 | 27.1 | 27.3 | 25.6 | 29.7 | 30.7 | 34.7 | 30.4 | 27.0 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 20.9 | 19.5 | 18.1 | 22.1 | 22.0 | 25.7 | 22.1 | 19.0 |
| | 夏季空调日平均温度 | 23.5 | 22.5 | 21.3 | 24.0 | 25.9 | 28.5 | 25.5 | 22.4 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 69 | 74 | 46 | 78 | 72 | 85 | 77 | 67 |
| | 夏季通风相对湿度 | 67 | 63 | 59 | 69 | 62 | 67 | 63 | 68 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.3 | 1.6 | 2.5 | 1.0 | 3.2 | 0.8 | 2.2 | 2.3 |
| | 冬季平均风速 | 1.5 | 2.4 | 4.2 | 0.9 | 3.8 | 0.4 | 2.9 | 2.7 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSW（50/10） | C/NE（48/12） | C/ESE（18/11） | C/SW（51/10） | S（26） | C/ESE（58/8） | SSE（25） | C/SSW（19/19） |
| | 冬季风向及频率 | C/WSW（54/10） | C/NE（32/20） | WNW（21） | C/WSW（57/7） | SW（24） | C/ESE（72/3） | S（26） | SW（19） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 835.7 | 805.3 | 762.6 | 871.8 | 865.0 | 951.3 | 875.4 | 810.9 |
| | 夏季大气压力 | 830.3 | 802.0 | 761.0 | 865.3 | 871.4 | 942.7 | 868.2 | 807.6 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | 12.04～02.14 | — | — | — | — | — | — |
| | ≤8℃的天数 | 6 | 122 | 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 |
| | ≤8℃的起止日期 | 01.01～01.06 | 11.10～03.11 | 11.27～02.16 | — | — | — | — | 12.08～02.05 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 32.4 | 33.4 | 32.3 | 35.7 | 35.9 | 41.1 | 35.9 | 33.3 |
| | 极端最低温度 | –3.8 | –10.6 | –10.3 | –2.5 | –3.9 | 1.9 | –3.0 | –9.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 云南（25） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 玉溪 | 临沧 | 楚雄州 | 大理州 | 德宏州 | 怒江州 | 迪庆州 |
| 海拔（m） | | 1636.7 | 1502.4 | 1772.0 | 1990.5 | 776.6 | 1804.9 | 3276.1 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 15.9 | 17.5 | 16.0 | 14.9 | 20.3 | 15.8 | 5.9 |
| | 冬季采暖计算温度 | 5.5 | 9.2 | 5.6 | 5.2 | 10.9 | 6.7 | −6.1 |
| | 冬季空调计算温度 | 3.4 | 7.7 | 3.2 | 3.5 | 9.9 | 5.6 | −8.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | — | — | — | — | — | — | 0.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | — | — | 7.9 | 7.5 | — | — | 1.1 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 28.2 | 28.8 | 28.0 | 26.2 | 31.4 | 26.7 | 20.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 20.8 | 21.3 | 20.1 | 20.2 | 24.5 | 20.0 | 13.8 |
| | 夏季空调日平均温度 | 23.2 | 23.6 | 23.9 | 22.3 | 26.4 | 22.4 | 15.6 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 73 | 65 | 75 | 66 | 78 | 56 | 60 |
| | 夏季通风相对湿度 | 65 | 69 | 61 | 64 | 72 | 78 | 63 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.4 | 1.0 | 1.5 | 1.9 | 1.1 | 2.1 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 1.7 | 1.0 | 1.5 | 3.4 | 0.7 | 2.1 | 2.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/WSW（46/10） | C/NE（54/8） | C/WSW（32/14） | C/NW（27/10） | C/WSW（46/10） | WSW（30） | C/SSW（37/14） |
| | 冬季风向及频率 | C/WSW（61/6） | C/W（60/4） | C/WSW（45/14） | C/ESE（15/8） | C/WSW（61/6） | C/NNE（18/17） | C/SSW（38/40） |
| 最大冻土深度（cm） | | — | — | — | — | — | — | 25 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 837.2 | 851.2 | 823.3 | 802.0 | 927.6 | 820.9 | 684.5 |
| | 夏季大气压力 | 823.1 | 845.4 | 818.8 | 798.7 | 918.6 | 816.2 | 685.8 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 176 |
| | ≤5℃的起止日期 | — | — | — | — | — | — | 10.23～04.16 |
| | ≤8℃的天数 | 0 | 0 | 8 | 29 | 0 | 0 | 208 |
| | ≤8℃的起止日期 | — | — | 01.01～01.08 | 12.15～01.12 | — | — | 10.10～05.05 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 32.6 | 34.4 | 33.0 | 31.6 | 36.4 | 32.5 | 25.6 |
| | 极端最低温度 | −5.5 | −1.3 | −4.8 | −4.2 | 1.4 | −0.5 | −27.4 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 西藏（26） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 拉萨 | 昌都 | 那曲 | 日喀则 | 林芝 | 阿里地区 | 山南地区 |
| 海拔（m） | | 3648.7 | 3306 | 4507 | 3936 | 2991.8 | 4278 | 9280 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 8.0 | 7.6 | −1.2 | 6.5 | 8.7 | 0.4 | −0.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | −5.2 | −5.9 | −17.2 | −7.3 | −2.0 | −19.8 | −14.4 |
| | 冬季空调计算温度 | −7.6 | −7.6 | −21.9 | −9.1 | −8.7 | −24.5 | −18.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −0.6 | 0.3 | −5.3 | −0.3 | 2.0 | −5.5 | −3.7 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 2.17 | 1.6 | −3.4 | 1.0 | 3.4 | −4.3 | −0.1 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 24.1 | 26.2 | 17.2 | 22.6 | 22.9 | 22.0 | 13.2 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 13.5 | 15.1 | 9.1 | 13.4 | 15.6 | 9.5 | 8.7 |
| | 夏季空调日平均温度 | 19.2 | 19.6 | 11.5 | 17.1 | 17.9 | 16.4 | 9.0 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 28 | 37 | 40 | 28 | 49 | 37 | 64 |
| | 夏季通风相对湿度 | 38 | 46 | 52 | 40 | 61 | 31 | 68 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.8 | 1.2 | 2.5 | 1.3 | 1.6 | 3.2 | 4.1 |
| | 冬季平均风速 | 2.0 | 0.9 | 3.0 | 1.8 | 2.0 | 2.6 | 3.6 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SE（30/12） | C/NW（48/6） | C/SE（30/7） | C/SSE（51/9） | C/E（38/11） | C/W（24/14） | WSW（31） |
| | 冬季风向及频率 | C/ESE（27/15） | C/NW（61/5） | C/WNW（39/11） | C/W（50/11） | C/E（27/17） | C/W（41/17） | C/WSW（32/17） |
| 最大冻土深度（cm） | | 19 | 81 | 281 | 58 | 13 | — | 86 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 650.6 | 679.9 | 583.9 | 636.1 | 706.5 | 602.0 | 598.3 |
| | 夏季大气压力 | 652.9 | 681.7 | 589.1 | 638.5 | 706.2 | 604.8 | 602.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 132 | 148 | 254 | 159 | 116 | 238 | 251 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.01～03.12 | 10.28～03.24 | 09.17～05.28 | 10.22～03.29 | 11.13～03.08 | 09.28～05.23 | 09.23～05.31 |
| | ≤8℃的天数 | 179 | 185 | 300 | 194 | 172 | 263 | 365 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.19～04.15 | 10.17～04.19 | 08.23～06.18 | 10.11～04.22 | 10.24～04.13 | 09.19～06.08 | 01.01～12.31 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 29.9 | 33.4 | 24.2 | 28.5 | 30.3 | 27.6 | 18.4 |
| | 极端最低温度 | −16.5 | −20.7 | −37.6 | −21.3 | −13.7 | −36.6 | −37.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 陕西（27） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 西安 | 延安 | 宝鸡 | 汉中 | 榆林 | 安康 | 铜川 | 咸阳 |
| 海拔（m） | | 397.5 | 958.5 | 612.4 | 509.5 | 1057.5 | 290.8 | 978.9 | 447.8 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 13.7 | 9.9 | 13.2 | 14.4 | 8.3 | 15.6 | 10.6 | 13.2 |
| | 冬季采暖计算温度 | −3.4 | −10.3 | −3.4 | −0.1 | −15.1 | 0.9 | −7.2 | −3.6 |
| | 冬季空调计算温度 | −5.7 | −13.3 | −5.8 | −1.8 | −19.3 | −0.9 | −9.8 | −5.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 1.5 | −0.9 | 1.6 | 3.0 | −3.9 | 3.8 | 0.2 | 1.2 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 2.6 | −0.5 | 3.0 | 4.3 | −2.8 | 4.9 | 0.6 | 2.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 35.0 | 32.4 | 34.1 | 32.3 | 32.2 | 35.0 | 31.5 | 34.3 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 25.8 | 22.8 | 24.6 | 26.0 | 21.5 | 26.8 | 23.0 | — |
| | 夏季空调日平均温度 | 30.7 | 26.1 | 29.2 | 28.5 | 26.5 | 30.7 | 26.5 | 29.8 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 66 | 53 | 62 | 80 | 55 | 71 | 55 | 67 |
| | 夏季通风相对湿度 | 58 | 52 | 58 | 69 | 45 | 64 | 60 | 61 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.9 | 1.6 | 1.5 | 1.1 | 2.3 | 1.3 | 2.2 | 1.7 |
| | 冬季平均风速 | 1.4 | 1.8 | 1.1 | 0.9 | 1.7 | 1.2 | 2.2 | 1.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ENE（29/13） | C/WSW（28/16） | C/ESE（37/12） | C/ESE（43/9） | C/S（27/17） | C/E（41/7） | ENE（20） | C/WNW（28/28） |
| | 冬季风向及频率 | C/ENE（41/10） | C/WSW（25/20） | C/ESE（54/13） | C/ESE（55/8） | C/N（43/14） | C/E（49/13） | ENE（31） | C/WNW（34/7） |
| 最大冻土深度（cm） | | 37 | 77 | 29 | 8 | 148 | 8 | 53 | 24 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 979.1 | 913.8 | 958.7 | 964.3 | 902.2 | 990.6 | 911.1 | 971.1 |
| | 夏季大气压力 | 959.8 | 900.7 | 936.9 | 947.8 | 889.9 | 971.7 | 898.4 | 953.1 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 100 | 133 | 101 | 72 | 153 | 60 | 128 | 101 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.23～03.02 | 11.06～03.18 | 11.23～03.03 | 12.04～02.13 | 10.27～03.28 | 12.12～02.09 | 11.10～03.17 | 11.23～03.03 |
| | ≤8℃的天数 | 127 | 159 | 135 | 115 | 171 | 100 | 148 | 133 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.09～03.15 | 10.23～03.30 | 11.08～03.22 | 11.15～03.09 | 10.17～04.05 | 12.26～03.05 | 11.03～03.30 | 11.08～03.20 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 41.8 | 38.3 | 41.6 | 38.3 | 38.6 | 41.3 | 37.7 | 40.4 |
| | 极端最低温度 | −12.8 | −23.0 | −16.1 | −10.0 | −30.0 | −9.7 | −21.8 | −19.4 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 陕西（27） | 甘肃（28） | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 商洲(商洛) | 兰州 | 酒泉 | 平凉 | 天水 | 武都 | 张掖 |
| 海拔（m） | | 742.2 | 1517.2 | 1477.2 | 1346.6 | 1141.7 | 1079.1 | 1482.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 12.8 | 9.8 | 7.5 | 8.8 | 11.0 | 14.6 | 7.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | –3.3 | –9.0 | –14.5 | –8.8 | –5.7 | 0 | –13.7 |
| | 冬季空调计算温度 | –5.0 | –11.5 | –18.5 | –12.3 | –8.4 | –2.3 | –17.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | 1.9 | –1.9 | –4.0 | –1.3 | 0.3 | 3.7 | –4.0 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | 3.3 | –0.3 | –2.4 | 0.0 | 1.4 | 4.8 | –2.9 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.9 | 31.2 | 30.5 | 29.8 | 30.8 | 32.6 | 31.7 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 24.32 | 20.1 | 19.6 | 21.3 | 21.8 | 22.3 | 19.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 27.8 | 26.0 | 24.8 | 24.0 | 25.9 | 28.5 | 25.1 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 59 | 54 | 53 | 55 | 62 | 51 | 52 |
| | 夏季通风相对湿度 | 56 | 45 | 39 | 56 | 55 | 52 | 37 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.2 | 1.2 | 2.2 | 1.9 | 1.2 | 1.7 | 2.0 |
| | 冬季平均风速 | 2.6 | 0.5 | 2.0 | 2.1 | 1.0 | 1.2 | 1.8 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SE（27/18） | C/ESE（48/9） | C/ESE（24/8） | C/SE（24/14） | C/ESE（43/15） | C/SSE（39/10） | C/S（25/12） |
| | 冬季风向及频率 | C/NW（22/16） | C/E（74/5） | C/W（21/12） | C/NW（23/20） | C/ESE（51/15） | C/ENE（47/6） | C/S（27/13） |
| 最大冻土深度（cm） | | 18 | 98 | 117 | 48 | 90 | 13 | 113 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 927.7 | 851.5 | 856.3 | 870.0 | 892.4 | 898.0 | 855.5 |
| | 夏季大气压力 | 923.3 | 843.2 | 847.2 | 860.8 | 881.2 | 887.3 | 846.5 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 100 | 130 | 157 | 143 | 119 | 64 | 159 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.25～03.04 | 11.05～03.14 | 10.23～03.28 | 11.05～03.27 | 11.11～03.09 | 12.09～02.10 | 10.21～03.28 |
| | ≤8℃的天数 | 139 | 160 | 183 | 170 | 145 | 102 | 178 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.09～03.22 | 10.20～03.28 | 10.12～04.12 | 10.18～04.05 | 11.04～03.28 | 11.23～03.04 | 10.12～04.07 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.9 | 39.8 | 36.6 | 36.0 | 38.2 | 28.6 | 38.6 |
| | 极端最低温度 | –13.9 | –12.7 | –29.8 | –24.3 | –17.4 | –8.6 | –28.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 甘肃（28） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 靖远(白银) | 金昌 | 庆阳 | 定西 | 武威 | 临夏 | 甘南州 |
| 海拔（m） | | 1398.2 | 1976.1 | 1421.0 | 1886.6 | 1530.9 | 1917.0 | 2910.0 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 9.0 | 5.0 | 8.7 | 7.2 | 7.9 | 7.0 | 2.4 |
| | 冬季采暖计算温度 | −10.7 | −14.8 | −9.6 | −11.3 | −12.7 | −10.6 | −13.8 |
| | 冬季空调计算温度 | −13.9 | −18.2 | −12.9 | −15.2 | −16.3 | −13.4 | −16.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −2.7 | −4.3 | −1,5 | −2.2 | −3.1 | −2.2 | −3.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −1.1 | −3.0 | −0.2 | −0.8 | −2.0 | −0.8 | −1.8 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 30.9 | 27.3 | 28.7 | 27.7 | 30.9 | 26.9 | 22.3 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 21.0 | 17.2 | 20.6 | 19.2 | 19.6 | 19.4 | 14.5 |
| | 夏季空调日平均温度 | 25.9 | 20.6 | 24.3 | 22.1 | 24.8 | 21.2 | 15.9 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 58 | 45 | 53 | 62 | 49 | 59 | 49 |
| | 夏季通风相对湿度 | 48 | 45 | 57 | 55 | 41 | 57 | 54 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.8 | 3.1 | 2.4 | 1.2 | 1.8 | 1.0 | 1.5 |
| | 冬季平均风速 | 0.7 | 2.6 | 2.2 | 1.0 | 1.6 | 1.2 | 1.0 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/S（49/10） | WNW（21） | SSW（16） | C/SSW（43/7） | C/NNW（35/9） | C/WSW（54/9） | C/N（46/13） |
| | 冬季风向及频率 | C/ENE（69/6） | C/WNW（27/16） | C/NNW（13/10） | C/NE（52/7） | C/SW（35/11） | C/N（47/10） | C/N（68/8） |
| 最大冻土深度（cm） | | 86 | 159 | 79 | 114 | 141 | 85 | 142 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 864.5 | 802.8 | 861.8 | 812.6 | 850.3 | 809.4 | 713.2 |
| | 夏季大气压力 | 855.0 | 798.9 | 853.5 | 808.1 | 841.8 | 805.1 | 716.0 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 138 | 175 | 144 | 155 | 155 | 156 | 202 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.03～03.20 | 10.15～04.04 | 11.05～03.28 | 10.25～03.28 | 10.24～03.27 | 10.24～03.28 | 10.08～04.27 |
| | ≤8℃的天数 | 167 | 199 | 171 | 183 | 174 | 185 | 250 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.19～04.03 | 10.05～04.21 | 10.18～04.06 | 10.14～04.14 | 10.14～04.05 | 10.13～04.15 | 09.15～05.22 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.5 | 35.1 | 36.4 | 36.1 | 35.1 | 36.4 | 30.4 |
| | 极端最低温度 | −24.3 | −28.3 | −22.6 | −27.9 | −28.3 | −24.7 | −27.9 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 青海（29） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 西宁 | 玉树 | 格尔木 | 黄南州 | 海南州 | 果洛州 | 祁连 |
| 海拔（m） | | 2295.2 | 3681.2 | 2807.3 | 8500.0 | 2835.0 | 3967.5 | 2787.4 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 6.1 | 3.2 | 5.3 | 0.0 | 4.0 | −0.9 | 1.0 |
| | 冬季采暖计算温度 | −11.4 | −11.9 | −12.9 | −18.0 | −14.0 | −18.0 | −17.2 |
| | 冬季空调计算温度 | −13.6 | −15.8 | −15.7 | −22.0 | −16.6 | −21.1 | −19.7 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −2.6 | −2.7 | −3.8 | −4.5 | −4.1 | −4.9 | −5.8 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −1.4 | −0.8 | −2.4 | −2.8 | −2.7 | −2.9 | −3.8 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 26.5 | 21.8 | 26.9 | 19.0 | 24.6 | 17.3 | 23.0 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 16.6 | 13.1 | 13.3 | 12.4 | 14.8 | 10.9 | 13.3 |
| | 夏季空调日平均温度 | 20.8 | 15.5 | 21.4 | 13.2 | 19.3 | 12.1 | 15.0 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 45 | 44 | 39 | 55 | 43 | 53 | 44 |
| | 夏季通风相对湿度 | 48 | 50 | 30 | 58 | 48 | 57 | 48 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.5 | 0.8 | 3.3 | 2.4 | 2.0 | 2.2 | 2.2 |
| | 冬季平均风速 | 1.3 | 1.1 | 2.2 | 1.9 | 1.4 | 2.0 | 1.5 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SSE（37/17） | C/E（63/17） | WNW（20） | C/SE（29/13） | C/SSE（30/8） | C/ENE（32/12） | C/SSE（23/10） |
| | 冬季风向及频率 | C/SE（49/18） | C/WNE（62/7） | C/WSW（23/12） | C/NW（47/6） | C/NNE（36/10） | C/WNW（48/7） | C/SSE（36/13） |
| 最大冻土深度（cm） | | 123 | 104 | 84 | 177 | 150 | 238 | 250 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 774.4 | 647.5 | 723.5 | 663.1 | 720.1 | 624.0 | 725.1 |
| | 夏季大气压力 | 772.9 | 651.5 | 724.0 | 668.4 | 721.8 | 630.1 | 727.3 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 165 | 199 | 176 | 243 | 183 | 255 | 213 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.20～04.02 | 10.09～04.25 | 10.15～04.08 | 09.17～05.17 | 10.14～04.14 | 09.14～05.26 | 09.29～04.29 |
| | ≤8℃的天数 | 190 | 248 | 203 | 285 | 210 | 302 | 252 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.10～04.17 | 09.17～05.22 | 10.02～04.22 | 09.01～06.12 | 09.30～04.27 | 08.23～06.20 | 09.12～05.21 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 36.5 | 28.5 | 35.5 | 26.2 | 33.7 | 23.3 | 33.3 |
| | 极端最低温度 | −24.9 | −27.6 | −26.9 | −37.2 | −27.7 | −34.0 | −342.0 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 青海（29） | 宁夏（30） | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 民和 | 银川 | 石嘴山 | 吴忠 | 固原 | 中卫 |
| 海拔（m） | | 1813.9 | 1111.4 | 1091.0 | 1343.9 | 1758.0 | 1225.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 7.5 | 9.0 | 8.8 | 9.1 | 6.4 | 8.7 |
| | 冬季采暖计算温度 | −10.5 | −13.1 | −13.6 | −12.0 | −13.2 | −12.6 |
| | 冬季空调计算温度 | −13.4 | −17.3 | −17.4 | −16.0 | −17.3 | −16.4 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −2.1 | −3.2 | −3.7 | −2.8 | −3.1 | −3.1 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −0.8 | −1.8 | −2.5 | −1.4 | −1.9 | −1.6 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 28.8 | 31.2 | 31.8 | 32.4 | 27.7 | 31.0 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 19.4 | 22.1 | 21.5 | 20.7 | 19.0 | 21.1 |
| | 夏季空调日平均温度 | 23.3 | 26.2 | 26.8 | 26.6 | 22.2 | 25.7 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 51 | 55 | 50 | 50 | 56 | 51 |
| | 夏季通风相对湿度 | 50 | 48 | 42 | 40 | 54 | 47 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 1.4 | 2.1 | 3.1 | 3.2 | 2.2 | 1.9 |
| | 冬季平均风速 | 1.4 | 1.8 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 1.8 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/SE（38/8） | C/SSW（21/11） | C/SSW（15/12） | SSE（23） | C/SSE（19/14） | C/ESE（37/20） |
| | 冬季风向及频率 | C/SE（40/10） | C/NNE（26/11） | C/NNE（26/11） | C/SSE（22/19） | C/NNW（18/9） | C/WNW（46/11） |
| 最大冻土深度（cm） | | 108 | 88 | 91 | 130 | 121 | 66 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 820.3 | 896.1 | 898.2 | 870.6 | 826.8 | 883.0 |
| | 夏季大气压力 | 815.0 | 883.9 | 8857 | 860.6 | 821.1 | 871.7 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 146 | 145 | 146 | 143 | 166 | 145 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.02～03.27 | 11.03～03.27 | 11.02～03.27 | 11.04～03.26 | 10.21～04.04 | 11.02～03.26 |
| | ≤8℃的天数 | 173 | 169 | 169 | 168 | 189 | 170 |
| | ≤8℃的起止日期 | 11.15～04.05 | 10.19～04.05 | 10.19～04.05 | 10.19～04.04 | 10.10～04.16 | 10.18～04.05 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 37.2 | 38.7 | 38.0 | 39.0 | 34.6 | 37.6 |
| | 极端最低温度 | −24.9 | −27.7 | −28.4 | −27.1 | −30.9 | −29.2 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 新疆（31） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 乌鲁木齐 | 克拉玛依 | 吐鲁番 | 哈密 | 和田 | 阿勒泰 | 喀什 |
| 海拔（m） | | 917.9 | 449.5 | 34.5 | 737.2 | 1374.5 | 735.3 | 1288.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 7.0 | 8.6 | 14.4 | 10.0 | 12.5 | 4.5 | 11.8 |
| | 冬季采暖计算温度 | −19.7 | −22.2 | −12.6 | −15.6 | −8.7 | −24.5 | −10.9 |
| | 冬季空调计算温度 | −23.7 | −26.5 | −17.1 | −18.9 | −12.8 | −29.5 | −14.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −7.1 | −8.6 | −3.4 | −4.7 | −1.4 | −8.6 | −1.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −5.4 | −7.0 | −2.0 | −3.2 | −9.3 | −7.5 | −0.7 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 33.5 | 36.4 | 40.3 | 35.8 | 34.5 | 30.8 | 33.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 18.2 | 19.8 | 24.2 | 22.3 | 21.6 | 19.9 | 21.8 |
| | 夏季空调日平均温度 | 28.3 | 32.8 | 35.3 | 30.0 | 28.9 | 26.3 | 28.7 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 78 | 78 | 60 | 60 | 54 | 74 | 67 |
| | 夏季通风相对湿度 | 34 | 26 | 26 | 28 | 36 | 43 | 34 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 3.0 | 4.4 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 2.6 | 2.1 |
| | 冬季平均风速 | 1.6 | 1.1 | 0.5 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.1 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | NNW（15） | NNW（29） | C/ESE（34/8） | C/ESE（36/13） | C/WSW（19/10） | C/WNW（23/15） | C/NNW（22/8） |
| | 冬季风向及频率 | C/SSW（29/10） | C/E（49/7） | C/SSE（67/4） | C/ESE（37/16） | C/WSW（31/8） | C/ENE（52/9） | C/NNW（44/9） |
| 最大冻土深度（cm） | | 139 | 192 | 83 | 127 | 64 | 139 | 66 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 924.6 | 979.0 | 1027.9 | 939.6 | 866.9 | 941.1 | 876.9 |
| | 夏季大气压力 | 911.2 | 979.0 | 997.6 | 921.0 | 856.5 | 925.0 | 866.0 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 158 | 147 | 118 | 141 | 114 | 176 | 121 |
| | ≤5℃的起止日期 | 10.24～03.30 | 10.21～03.26 | 11.07～03.04 | 10.31～03.20 | 11.12～03.06 | 10.17～04.10 | 11.09～03.09 |
| | ≤8℃的天数 | 180 | 165 | 136 | 162 | 132 | 190 | 139 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10. 14 ～04.11 | 10.19～04.01 | 10.30～03.14 | 10.13～03.28 | 11.03～03.14 | 10.08～04.15 | 11.30～03.17 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 42.1 | 42.7 | 47.7 | 43.2 | 41.1 | 37.5 | 39.9 |
| | 极端最低温度 | −32.5 | −34.3 | −25.2 | −28.6 | −20.1 | −41.6 | −23.6 |

续表

| 省/直辖市/自治区 | | 新疆（30） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 市/自治州 | | 伊宁 | 库尔勒 | 奇台 | 精河 | 阿克苏 | 塔城 | 乌恰 |
| 海拔（m） | | 662.5 | 931.5 | 793.5 | 320.1 | 1103.8 | 534.9 | 2175.7 |
| 温度（℃） | 年平均温度 | 9.0 | 11.7 | 5.2 | 7.8 | 10.3 | 7.1 | 7.3 |
| | 冬季采暖计算温度 | −16.9 | −11.7 | −24.0 | −22.2 | −12.5 | −19.2 | −14.1 |
| | 冬季空调计算温度 | −21.5 | −15.3 | −28.2 | −25.8 | −16.2 | −24.7 | −17.9 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤5） | −3.9 | −2.9 | −9.5 | −7.7 | −3.5 | −5.4 | −3.6 |
| | 冬季采暖期平均温度（≤8） | −2.6 | −1.4 | −7.4 | −6.2 | −1.8 | −4.1 | −1.9 |
| | 夏季空调计算干球温度 | 32.9 | 34.5 | 33.5 | 34.8 | 32.7 | 33.6 | 28.8 |
| | 夏季空调计算湿球温度 | 21.3 | 22.1 | 19.5 | — | — | — | — |
| | 夏季空调日平均温度 | 26.3 | 30.6 | 28.2 | 28.7 | 27.1 | 26.9 | 24.3 |
| 相对湿度（%） | 冬季空调相对湿度 | 78 | 63 | 79 | 81 | 69 | 72 | 59 |
| | 夏季通风相对湿度 | 45 | 33 | 34 | 39 | 39 | 39 | 27 |
| 风速（m/s） | 夏季平均风速 | 2.0 | 2.6 | 3.5 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 3.1 |
| | 冬季平均风速 | 1.3 | 1.8 | 2.5 | 1.0 | 1.2 | 2.0 | 1.4 |
| 风向及频率（%） | 夏季风向及频率 | C/ESE（20/16） | C/ENE（28/19） | SSW（18） | C/SSW（28/14） | C/NNW（28/8） | N（16） | C/WNW（21/15） |
| | 冬季风向及频率 | C/E（38/14） | C/E（38/19） | SSW（19） | C/SSW（49/12） | C/NNW（32/15） | C/NNE（22/22） | C/WNW（59/7） |
| 最大冻土深度（cm） | | 60 | 58 | 136 | 141 | 80 | 160 | 650 |
| 大气压力（hPa） | 冬季大气压力 | 947.4 | 917.6 | 934.1 | 994.1 | 897.3 | 963.2 | 786.2 |
| | 夏季大气压力 | 934.0 | 902.3 | 919.4 | 971.2 | 884.3 | 947.5 | 784.4 |
| 采暖天数及其起止日期 | ≤5℃的天数 | 141 | 127 | 164 | 152 | 124 | 162 | 153 |
| | ≤5℃的起止日期 | 11.03～03.23 | 11.06～03.12 | 10.19～03.31 | 10.27～03.27 | 11.04～03.07 | 10.23～04.02 | 10.27～03.28 |
| | ≤8℃的天数 | 161 | 150 | 187 | 170 | 137 | 182 | 182 |
| | ≤8℃的起止日期 | 10.20～03.29 | 10.24～03.22 | 10.09～04.13 | 10.16～04.03 | 10.22～03.07 | 10.13～04.12 | 10.13～04.12 |
| 极端温度（℃） | 极端最高温度 | 39.2 | 40.0 | 40.5 | 41.6 | 39.6 | 41.3 | 35.7 |
| | 极端最低温度 | −36.0 | −25.3 | −40.1 | −33.8 | −25.2 | −37.1 | −29.9 |

# 主要量的符号及其计量单位

| 量　的　名　称 | 符号 | 计量单位 | 量　的　名　称 | 符号 | 计量单位 |
|---|---|---|---|---|---|
| 长度，间距，距离 | $L$ | km，m，mm | 水流量 | $Q$ | t/h，m³/h |
| 宽度 | $b$ | m,mm | 功率 | $P$ | kW |
| 管道当量长度 | $L_{eq}$ | km，m，mm | 阻力、泵的扬程、压差 | $H$ | kPa，MPa |
| 厚度 | $\delta$ | m，mm | 转速 | $n$ | r/min |
| 高度，深度 | $H$，$h$ | mm | 摩擦阻力系数 | $\lambda$ | |
| 外径，内径，半径 | $D$，$d$，$R$ | m，mm | 局部阻力系数 | $\xi$ | |
| 水力半径 | $R_n$ | m | 摩擦系数 | $f$ | |
| 面积 | $A$ | mm²，m² | 充满系数 | $\psi$ | |
| 容积 | $V$ | m³ | 供气系统漏风系数 | $\phi$ | |
| 角度，夹角，倾角 | $\alpha$，$\gamma$，$\varphi$ | (°) | 等熵指数 | $\kappa$ | |
| 内摩擦角 | $\varphi_i$ | (°) | 两相流系数 | $k$ | |
| 外摩擦角 | $\varphi_0$ | (°) | 比热容 | $c$ | kJ/（kg·℃） |
| 安息角 | $\theta$ | (°) | 运输量 | $m$ | t |
| 粒径 | $d$ | mm，μm | 荷载，推力，牵引力 | $F$ | N，kN |
| 中位径 | $d_{50}$ | mm，μm | 数量 | $N$，$n$，$m$ | |
| 摄氏温度 | $t$ | ℃ | 补偿器轴向刚度 | $K_X$ | N/mm |
| 热力学温度 | $T$ | K | 补偿器轴向位移量 | $X$ | mm |
| 流速 | $v$ | m/s | 管道强度特性值 | $n$ | |
| 物料密度 | $\rho$ | t/m³，kg/m³ | 管材许用应力 | $\sigma$ | MPa |
| 物料堆积密度 | $\rho_d$ | t/m³，kg/m³ | 管材弹性模量 | $E$ | kN/mm² |
| 物料真实密度 | $\rho_z$ | t/m³，kg/m³ | 斜度，坡度 | $i$ | % |
| 物料实际堆积密度 | $\rho_s$ | t/m³，kg/m³ | 燃料收到基灰分 | $A_{ar}$ | % |
| 灰渣量 | $G_{hz}$ | t/h | 锅炉机械未完全燃烧损失 | $q_4$ | % |
| 燃煤量 | $G_m$ | t/h | 循环流化床锅炉入炉物料折算灰分 | $A_{zs}$ | % |
| 渣量 | $G_z$ | t/h | 干燥无灰基挥发分 | $V_{daf}$ | % |
| 灰量 | $G_h$ | t/h | 效率 | $\eta$ | % |
| 省煤器灰量 | $G_{hs}$ | t/h | 水的运动黏度 | $\upsilon$ | m²/s |
| 空气预热器灰量 | $G_{hk}$ | t/h | 灰气比 | $\mu$ | kg/kg |
| 除尘器灰量 | $G_{hc}$ | t/h | 水渣比 | $r$ | kg/kg |
| 石子煤量 | $G_s$ | t/h | 压力 | $p$ | MPa，kPa，Pa |
| 设计出力 | $G$ | t/h | 时间，周期 | $t$，$\tau$ | h，min，s |
| 空气流量 | $q$ | t/h，kg/min，m³/min | | | |

# 参 考 文 献


[1] 杨旭中，于长友. 燃煤锅炉副产物处理手册[M]. 北京：中国电力出版社，2009.

[2] 原永涛. 火力发电厂气力除灰技术及其应用[M] 北京：中国电力出版社，2002.

[3] 崔功龙. 燃煤灰气力输送系统[M]. 北京：中国电力出版社，2005.

[4] 张亚丹，刘吉祥，等. 石油化工设备设计选用手册—储存容器 [M]. 北京：化工工业出版社，2009.

[5] 谢洪勇，刘志军. 粉体力学与工程 [M]. 北京：化工工业出版社，2007.

[6] 蔡渊，等. 火力发电厂除灰设计技术规程 [M]. 北京：中国计划出版社，2012.

[7] 朱昆泉，许林发. 建材机械工程手册[M]. 武汉：武汉工业大学出版社，2004.

[8] 压缩空气站设计手册编写组. 压缩空气站设计手册[M]. 北京：机械工业出版社，1993.

[9] 郁永章. 容积式压缩机技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，2000.10.

[10] 周大吉，等. 大型 CFB 电厂石灰石粉制备系统设计[J]. 电力建设，2011（12）.

[11] 许华，等. 干、湿式除渣系统对锅炉效率影响的研究[J]. 中国电力，2013（6）.